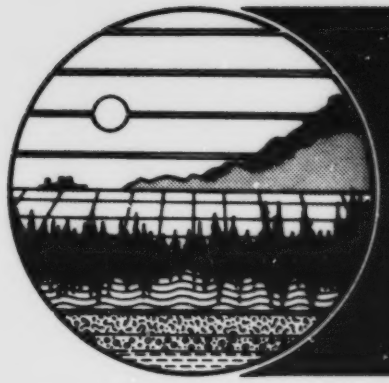


DIRECTION GENERALE DES TERRES

LANDS DIRECTORATE

Environment Canada Environnement Canada

0021869I VOL ISS 41 850300
EXC # 001
HD 107 W6714
DOCUMENT DE TRAVAIL. (CANADA. DIREC
TION GENERALE DES TERRES)
OOFF

SENSIBILITÉ À L'ACIDIFICATION DES LACS DU BOUCLIER CANADIEN: ANALYSE ET INTERPRÉTATION DE DONNÉES GÉOLOGIQUES ET BIOPHYSIQUES DE 158 BASSINS VERSANTS DU SUD DU QUÉBEC

DOCUMENT DE TRAVAIL nº 41

RECHERCHE SUR LES PRÉCIPITATIONS ACIDES

Environnement Canada Environment Canada

Canada

85-4277/

ERRATA

Les équations de l'annexe B devraient se lire comme suit:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^{N} (y_i - \bar{y})^2}$$

Par l'emploi d'un test de signification, on peut vérifier si r est significativement différent de zéro. L'hypothèse H_0 à vérifier est $\rho = 0$. L'hypothèse alternative est $H_1 : \rho \neq 0$ qui peut se décomposer en $\rho > 0$ (H_1') et $\rho < 0$ (H_1'').

$$t = \frac{r}{\sqrt{(1 - r^2) / (N - 2)}} \qquad r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^{N} d_i^2}{N(N^2 - 1)}$$

si $t > t(N-2; \alpha/2)$, on rejette H_0 et l'on a H_1': $\rho > 0$

si $t < -t(N-2; \alpha/2)$, on rejette H_0 et l'on a H_1'': $\rho < 0$.

Lorsque N est suffisamment grand (N > 10), on calcule la quantité suivante:

$$t = r_s \sqrt{\frac{N-2}{1 - r_s^2}}$$

Puisque cette quantité suit une loi de Student à (N-2) degrés de liberté, cette valeur peut être comparée à la valeur critique $t(N-2; \alpha/2)$.

Lorsque N est petit (N < 10), on compare r_s avec une valeur critique r_0 obtenue de tables. Il existe en fait une table des valeurs de $r_0(N; \alpha)$ que $|r_s|$ ne dépasse que dans $\alpha\%$ des cas. On accepte l'hypothèse H_0 ($r_s = 0$) si $|r_s| < r_0(N; \alpha/2)$. L'hypothèse H_0 est rejetée si $|r_s| > r_0(N; \alpha/2)$.

SENSIBILITÉ A L'ACIDIFICATION DES LACS DU BOUCLIER CANADIEN: ANALYSE ET INTERPRÉTATION DE DONNÉES GÉOLOGIQUES ET BIOPHYSIQUES DE 158 BASSINS VERSANTS DU SUD DU QUÉBEC

Marius Lachance
et
Daniel Gamache

Mars 1985

Région du Québec
Direction générale des terres
Service de conservation de l'environnement
Environnement Canada

Document de travail
No 41

Affiliation des Auteurs

Marius Lachance: Institut National de Recherche Scientifique, Eau

Daniel Gamache: Direction Générale des Terres, Région du Ouébec, Environnement Canada

No de cat.: En 73-4/41F
ISBN: 0-662-93136X

85

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier le personnel d'Environnement Canada, Direction générale des terres et Direction générale des eaux intérieures ainsi que le personnel de l'Institut national de recherche scientifique (INRS-Eau) pour leur collaboration, tant administrative que scientifique, dans chacune des étapes de cette recherche.

Nous voulons exprimer toute notre gratitude à messieurs Guy Gilbert et Jean-Louis Bélair (initiateurs du projet) ainsi qu'à messieurs Raymond Lemieux et Michel Slivitzky (coordonnateurs).

Nous tenons aussi à remercier madame Madeleine Papineau, messieurs John Haemmerli, Jacques Dupont, Robert Hélie et Mayer Alvo pour leurs critiques pertinentes de la version préliminaire du rapport.

Merci aussi à messieurs Denis Labonté et André Parent pour leur participation technique ainsi qu'à mesdames Lise Raymond et Lise Martin pour la mise en page du texte.

PRÉFACE

Ce rapport représente les efforts de recherche de la Direction générale des terres, région de Québec, ainsi que de l'Institut national de recherche scientifique - eau (INRS-Eau) de l'Université du Québec. Le rapport présente des analyses qui mènent à une évaluation compréhensive des relations écologiques qui existent entre les éléments aquatiques et terrestres des écosystèmes sensibles aux précipitations acides. Dans le sud-ouest du Québec, ces écosystèmes reçoivent un taux annuel élevé de précipitation acide et font l'objet d'une étude de contrôle et d'évaluation à long terme par le Service de conservation de l'environnement, Environnement Canada. Cette recherche a été financée par le programme fédéral de Transport à grande distance des polluants aériens (TGDPA) de 1982 à 1984.

RÉSUMÉ

Les données sur la géologie, la physiographie et la végétation de 158 bassins versants du Bouclier canadien, disséminés sur une bande de territoire s'étendant de la rivière des Outaouais au fjord du Saguenay, font l'objet d'une analyse et d'une interprétation en vue de mieux connaître les variables qui peuvent influencer ou expliquer la sensibilité des écosystèmes lacustres aux précipitations acides. Les lacs drainant ces bassins versants ont été échantillonnés par la Direction générale des eaux intérieures, région du Québec, au cours de l'hiver 1982, et les données physico-chimiques recueillies ont déjà été soumises à une première analyse (Bobée et al., 1983).

L'analyse descriptive des données biophysiques du milieu étudié par la Direction générale des terres souligne l'interrelation des variables d'altitude et de précipitation ainsi que la dépendance de certains types de végétation envers ces mêmes variables.

L'analyse des corrélations entre les variables biophysiques du milieu et les variables de qualité de l'eau fait ressortir que les variables du milieu les plus fortement reliées au pH et aux variables de minéralisation (Ca, Mg, K, alcalinité, conductivité, somme des cations, somme des anions) sont l'altitude du lac, la précipitation moyenne annuelle, la position selon l'axe S.O.-N.E. et la superficie relative d'arboré résineux à faible densité.

L'analyse discriminante, utilisée pour l'interprétation des variables géologiques, permet de déterminer qu'une partie importante de la composition chimique de l'eau des lacs est explicable par la géologie de la roche en place. En effet, les fonctions discriminantes, calculées à partir de la physico-chimie de l'eau des lacs, permettent de classer la majorité des lacs en cinq groupes correspondant à cinq regroupements de types de roches (roche calcosilicatée, marbre; anorthosite, grabbro, diorite; migmatites, paragneiss, gneiss; mangérite, monzonite; granite, quartzite) retrouvés sur le bassin versant.

L'emploi combiné de l'analyse factorielle des correspondances et d'une technique de classification permet l'analyse du comportement spatial de l'ensemble des variables du milieu considéré (physiographie, dépôts, végétation, géologie). Cette analyse globale permet de classer les bassins versants en cinq groupes correspondant à cinq zones de sensibilité plus ou moins grande à l'acidification par les précipitations acides. Ces zones, déterminées uniquement à partir des caractéristiques biophysiques et géologiques du milieu, s'intègrent à celles de Bobée et al. (1983) élaborées à partir de la physico-chimie des lacs.

ABSTRACT

Geological, physiographical and vegetation data for 158 watersheds extending from the Ottawa River to the Saguenay fjord in the Canadian Shield, were analysed and interpreted to determine which variables influence the ecosystem's sensitivity to incoming acidic precipiation. Lakes within the watersheds were sampled during the winter of 1982 by the Inland Waters Directorate, Québec Region. The physicochemical data generated was subsequently analysed (Bobée et al., 1983).

A descriptive analysis of the biophysical data of the study area revealed existing interrelationships between altitude, total precipitation and the presence of certain types of forest cover.

Correlation analysis between biophysical and water quality variables showed that the lake altitude, the average annual rainfall, the lake orientation in relation to a SW-NE axis, and the relative surface area of open conifer stands was closely correlated with the mineralization variables (Ca, Mg, K, alcalinity, conductivity, total cations and total anions).

Discriminant analysis used to interpret geological variables showed that, for the most part, the chemical composition of the lakes is influenced by the bedrock type. Discriminant functions, using lake physicochemical variables, allowed for the lakes to be classified into five groups correspond to rock types found within the watersheds (calcsilicate rock, marble; anorthosite, gabbro, diorite; migmatite, paragneiss, gneiss; mangerite, monzonite; granite and quartzite).

A combination of correspondence factorial analysis and classification techniques provided a spatial behavior analysis of all biophysical variables (physiography, surficial material, vegetation and geology). The analysis classified watersheds into five groups corresponding to five major sensitivity to acid precipitations zones. These zones, based solely on biophysical and geological variables, compare with those proposed by Bobée et al., (1983) based upon physicochemical data.

TABLE DES MATIÈRES

		Page
REMERCIEMENTS		ii
PRÉFACE		iii
RÉSUMÉ		iv
ABSTRACT		vi
TABLE DES MATIÈRES		vii
LISTE DES TABLEAUX		x
LISTE DES FIGURES		xii
1.	INTRODUCTION	1
1.1	Objectifs de l'étude	4
2.	CADRE BIOPHYSIQUE DE L'ÉTUDE	6
2.1	Géologie et dépôts meubles des hautes terres laurentiennes	6
2.2	Les sols	10
2.3	Le climat du Québec méridional	11
2.4	La végétation du Québec méridional	14
	2.4.1 La région forestière boréale	14
	a) La section Laurentides-Onatchiway	17
	b) La section Missinaibi-Cabonga	17
	2.4.2 La région forestière mixte du sud-est	18
	a) La section forestière du centre de l'Outaouais	18
	b) La section forestière laurentienne	19
	c) La section forestière du Saguenay	20
3.	DONNÉES	21
4.	ANALYSE DESCRIPTIVE DES VARIABLES BIOPHYSIQUES ET GÉOLOGIQUES	23
4.1	Variables physiques	23
	4.1.1 Variables physiographiques	23
	4.1.2 Variables concernant la nature et l'épaisseur des dépôts meubles	27

4.2	Variables de la végétation	36
4.3	Variables géologiques	41
4.4	Conclusion	45
5.	ANALYSE DES RELATIONS ENTRE LES VARIABLES PHYSICO-CHIMIQUES DE L'EAU DES LACS ET LES VARIABLES BIOPHYSIQUES DU MILIEU	46
5.1	Démarche utilisée	46
5.2	Identification des relations	47
5.3	Analyse globale des interrelations	52
5.4	Conclusion	59
6.	RELATIONS ENTRE LES VARIABLES GÉOLOGIQUES ET LES VARIABLES PHYSICO-CHIMIQUES	61
6.1	Démarche utilisée	61
6.2	Résultat de l'analyse discriminante	64
6.3	Conclusion	71
7.	ANALYSE DES INTERRELATIONS ENTRE LES VARIABLES BIOPHYSIQUES ET GÉOLOGIQUES	73
7.1	Démarche utilisée	73
7.2	Analyse des interrelations entre variables	77
	7.2.1 Groupement des points variables	77
	7.2.2 Composition des groupes	80
	7.2.3 Variables supplémentaires	84
7.3	Détermination des zones homogènes	85
7.4	Conclusion	92
8.	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	94
8.1	Importance des variables géologiques et biophysiques	94
8.2	Relations entre les variables biophysiques du milieu et les variables de qualité de l'eau	94
8.3	Relations entre les variables géologiques et physico-chimiques	95
8.4	Analyse des interrelations entre les variables géologiques et biophysiques	96

8.5 Revue des objectifs de l'étude 97
8.6 Recommandations 98

RÉFÉRENCES 100

ANNEXE A 103
ANNEXE B 112
ANNEXE C 116

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 3.1:	Données inventoriées pour l'étude: types, sources et utilité de l'information	22
Tableau 4.1:	Statistiques descriptives des variables physiographiques des 158 bassins versants de la région étudiée	25
Tableau 4.2:	Répartition des unités de superficie 0,1% du bassin versant selon le type et l'épaisseur du dépôt, la pente et le drainage	30
Tableau 4.3:	Nombre, moyenne et écart-type des superficies de bassin 0,1% selon le type de dépôts, la pente et le drainage	32
Tableau 4.4:	Distribution de fréquence des différents types de dépôts selon la superficie relative occupée sur le bassin	34
Tableau 4.5:	Répartition des unités de superficies de bassin versant 0,1% selon le type et la densité de végétation	38
Tableau 4.6:	Nombre, moyenne et écart-type des superficies de bassin versant 0,1% selon le type de végétation	39
Tableau 4.7:	Distribution de fréquence du nombre de bassins versants selon le type de végétation et la superficie relative	40
Tableau 5.1:	Coefficients de corrélation significativement différents de zéro (au niveau de 5%) entre les différents types de dépôts et les variables physico-chimiques	48

Tableau 5.2: Coefficients de corrélation significativement différents de zéro (au niveau de 5%) entre les variables physico-chimiques et les variables biophysiques 50

Tableau 5.3: Composition des huit groupes de points variables obtenus par l'application de la CAH sur les facteurs de l'ACP 57

Tableau 6.1: Résultats de l'analyse discriminante: lambda de Wilks pour chacune des variables, corrélation entre la variable et la fonction discriminante et coefficients de la fonction discriminante 66

Tableau 6.2: Résultats de la classification obtenus de l'analyse discriminante 67

Tableau 7.1: Seuils inférieurs et supérieurs utilisés pour le codage des variables en trois classes 75

Tableau 7.2: Répartition des classes de variables entre les six groupes de la CAH 78

Tableau 7.3: Classement des variables biophysiques d'après leur profil de variation 80

Tableau 7.4: Points variables ayant une contribution à la formation des groupes de bassins versants 87

Tableau 7.5: Répartition des bassins versants selon leur classification en cinq groupes et selon leur localisation à l'intérieur des cinq zones déterminées antérieurement par Bobée et al. (1983) 90

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1:	Localisation des 158 bassins versants inventoriés	2
Figure 2.1:	Position relative de l'orogénèse Grenvilhienne dans l'histoire géologique	7
Figure 2.2:	Divisions géologiques du Québec	8
Figure 2.3:	Moyenne des précipitations totales annuelles 1941-1970 (en mm)	12
Figure 2.4:	Régions forestières du Québec (modifiée à partir de la carte de Rowe, 1972)	15
Figure 2.5:	Sections forestières du Québec méridional	16
Figure 4.1:	Histogrammes de fréquence des variables physiographiques de la région étudiée	24
Figure 4.2:	Classification des bassins versants selon l'altitude du lac	26
Figure 4.3:	Classification des bassins versants selon la précipitation moyenne annuelle	28
Figure 4.4:	Classification des bassins versants selon le dépôt dominant (occupant le plus grand pourcentage de superficie dans chaque bassin versant).	35
Figure 4.5:	Classification des bassins versants selon le type de végétation dominant	42
Figure 4.6:	Classification des bassins versants selon dix groupes de roches	44

Figure 5.1: Représentation dans le plan des axes 1 et 2 des facteurs des variables obtenues de l'analyse en composantes principales l'(ACP) appliquée sur la matrice des coefficients de corrélation de Spearman 54

Figure 5.2: Classement hiérarchique des facteurs des variables obtenus de l'ACP appliqué sur la matrice des coefficients de corrélation de Spearman 56

Figure 6.1 Classification des bassins versants selon cinq groupes de roches 63

Figure 6.2: Représentation dans l'espace canonique des centroïdes des groupes de bassins versants et de la distribution des bassins versants selon leur groupe géologique pour chacune des surfaces d'appartenance 69

Figure 7.1: Classement hiérarchique des groupes de points variables et représentation dans le plan des axes principaux 1 et 2 des centres de gravité des groupes de points variables 77

Figure 7.2: Classement hiérarchique des groupes de points stations et représentation simultanée dans le plan des axes principaux 1 et 2 des centres de gravité des groupes de points stations et des groupes de points variables 86

Figure 7.3: Classification des bassins versants en cinq groupes définis dans l'étude et délimitation des zones déterminées par Bobée et al. (1983) 90

1. INTRODUCTION

En Amérique du Nord, la croissance industrielle rapide, l'utilisation de différentes sources d'énergie et, par conséquent, l'augmentation de la pollution sous toutes ses formes, nous obligent maintenant à connaître et à quantifier la capacité de l'environnement à absorber, transformer et recycler tout ce qui est utilisé et rejeté par l'homme. Il devient de plus en plus urgent de connaître les seuils au delà desquels on risquerait de modifier irréversiblement l'équilibre du milieu actuel.

Face à cette détérioration du milieu et surtout à son ampleur (pollution et dégradation du milieu de vie), les gouvernements, de tous les niveaux décisionnels, doivent au plus tôt se concerter afin d'identifier et de connaître les différentes sources de pollution, les différentes possibilités du milieu naturel à les recycler ainsi que les limites matérielles et potentielles de l'environnement à ne pas dépasser.

A l'hiver 1982 (du 10 janvier au 3 mars), dans le cadre d'un programme de recherche sur les pluies acides, la Direction générale des eaux intérieures (région du Québec) a procédé à l'échantillonnage de l'eau de 185 lacs, situés dans la partie sud-est du Bouclier canadien, sur une bande de 150 km de large s'étendant de la rivière des Outaouais au fjord du Saguenay (figure 1.1).

L'objectif principal de cet échantillonnage était d'évaluer le niveau d'acidité des eaux lacustres du Québec dans une région reconnue très sensible à l'acidification et exposée à d'importantes retombées acides d'origine atmosphérique et d'examiner l'importance des conditions climatiques, physiographiques, géologiques et géomorphologiques dans le contrôle du niveau d'acidification des lacs. Les résultats obtenus de cet échantillonnage devaient servir à l'implantation d'un réseau d'échantillonnage intégré et rationnel permettant de surveiller, dans le temps et l'espace, l'évolution de la qualité des eaux de surface du Québec et de détecter des tendances dans cette évolution.

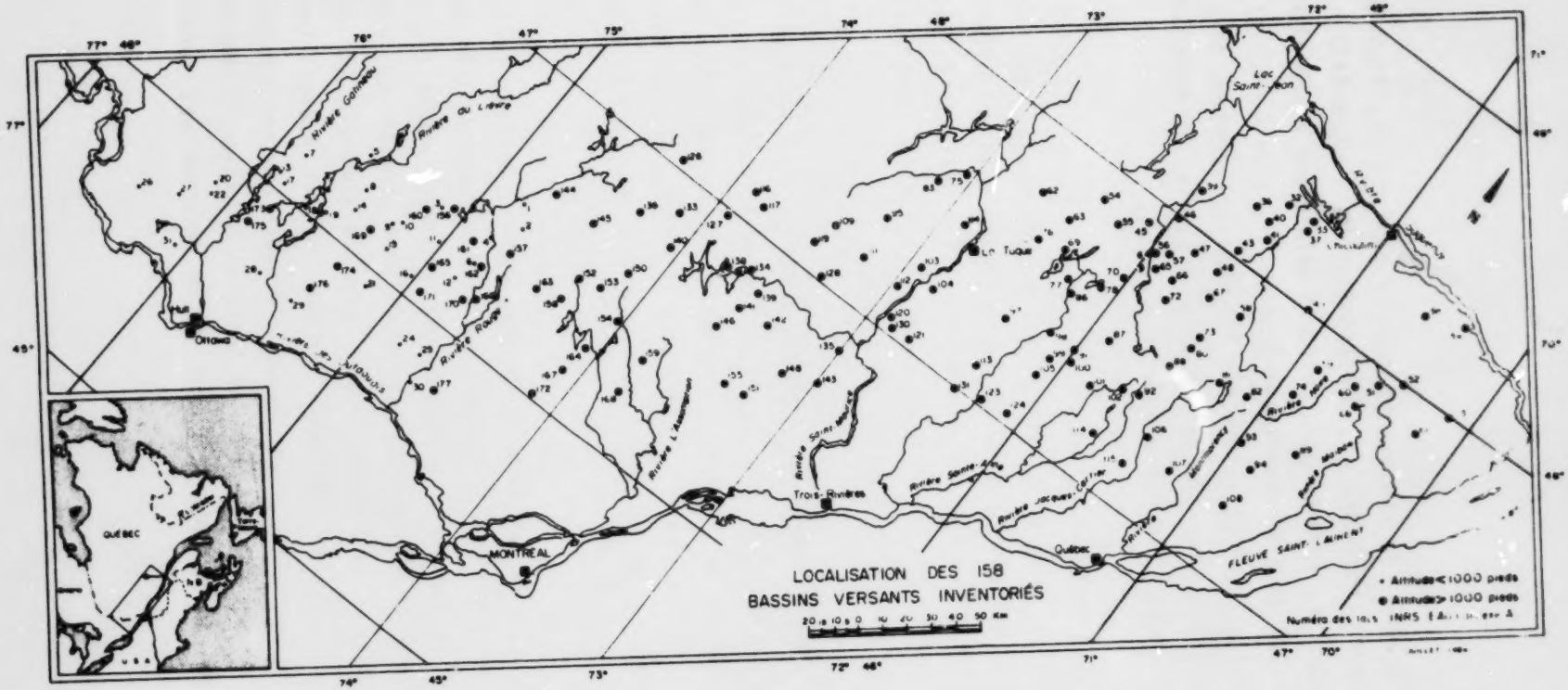


FIGURE 1.1: Localisation des 158 bassins versants inventoriés

L'étude de Bobée et al. (1983), portant sur l'analyse et l'interprétation des données physico-chimiques recueillies lors de cet échantillonnage, a montré que la majorité des lacs de la région étudiée sont sensibles à l'acidification par les précipitations et que les lacs les plus acides se retrouvent à l'intérieur de la zone identifiée la plus sensible et sont situés principalement dans la vallée de la rivière Saint-Maurice, la réserve de Portneuf et la réserve des Laurentides. Le gradient S.O.-N.E. observé pour les sulfates est interprété comme résultant de l'influence du transport atmosphérique à longue distance. L'application de modèles chimiques d'acidification n'a pas permis, cependant, d'affirmer que les lacs ont été acidifiés au cours des dernières années. L'application de méthodes d'analyse multivariée a permis une classification des lacs en cinq groupes à partir desquels on a identifié cinq zones de sensibilité différente à l'acidification. Suite à l'analyse des données, une méthodologie applicable à l'implantation d'un réseau de surveillance a été élaborée, et différents scénarios de plan d'échantillonnage ont été proposés.

Le nombre initial des lacs sélectionnés était de 185; il a été réduit par la suite à 177, car huit lacs visités ne satisfaisaient pas aux critères de sélection décrits dans Bobée et al. (1983). De ce nombre nous en avons retenu 158, dix-neuf ayant un mauvais bilan ionique ou une couleur trop élevée (teneur trop élevée en acide organique). La liste des lacs (ou bassins versants) ainsi que leurs coordonnées géographiques et leur géologie est donnée à l'annexe A et leur localisation apparaît à la figure 1.1.

La participation de la Direction générale des terres, en collaboration avec la Direction générale des eaux intérieures, aux programmes de recherche sur les pluies acides consiste à produire une description détaillée des écosystèmes de chacun des bassins versants des lacs choisis. Le choix de cette région (sud-ouest du Québec) a non seulement été influencé par le gradient de sensibilité du territoire et l'acidité des précipitations, mais aussi par la représentativité de la grande variété biophysique du Bouclier canadien.

1.1 Objectifs de l'étude

Les données recueillies lors de la caractérisation des 158 bassins versants de l'étude seront analysées et interprétées en fonction des objectifs suivants:

- Identification des types d'écosystèmes terrestres sensibles aux précipitations acides. Évaluer et délimiter, à partir des variables du milieu, les zones les plus affectées ou menacées par les effets des retombées acides. On aura ainsi une estimation des superficies vulnérables ou déja touchées par les processus d'acidification.

- Essayer d'identifier et de déterminer les variables géologiques et biophysiques (physiographie et végétation) qui influencent significativement la sensibilité des écosystèmes terrestres et lacustres aux pluies acides. On décrira globalement le comportement spatial de l'ensemble de ces variables et on délimitera sur la région étudiée des zones homogènes selon leur niveau de sensibilité et leur potentiel à neutraliser ou modifier les apports atmosphériques acides.

- Détermination, à l'aide des variables physico-chimiques de l'eau, du niveau d'altérabilité de la roche en place dans chaque bassin versant ainsi que de l'influence de celle-ci sur le pouvoir tampon et la sensibilité des différents milieux physiques.

- Détermination du rôle joué par les dépôts meubles (épaisseur, type, répartition) sur le pouvoir tampon ou la sensibilité des écosystèmes terrestres. On considèrera également la pente et le drainage associé à chaque type de dépôt.

- Détermination, par l'étude des interrelations entre différentes variables, du rôle joué par la végétation face aux pluies acides.

On cherchera a déterminer s'il existe une différence significative de la qualité de l'eau des lacs des bassins versants dont la forêt dominante est composée de conifères et ceux dont le couvert dominant est le feuillu.

En plus des objectifs principaux, on peut mentionner deux utilisations ultérieures possibles des résultats de l'étude:

- Les données biophysiques et géologiques inventoriées compléteront la banque de données de la Direction générale des eaux intérieures sur la physico-chimie de l'eau des lacs.

- La détermination des types d'écosystèmes vulnérables aux effets des pluies acides pourra servir à évaluer l'exactitude et le niveau de précision des différentes cartes de sensibilité parues récemment (UNITED STATES - CANADA, 1983).

Suite à une description générale du cadre biophysique de l'étude (chapitre 2), à un bref compte rendu de la méthodologie utilisée (chapitre 3) et à une analyse du contenu en information de chacune des variables répertoriées (chapitre 4), on tentera, à l'aide de différentes méthodes statistiques, de mettre en relation les différents types de variables considérées. Au chapitre 5, on examinera les relations entre les variables physico-chimiques de l'eau et les variables biophysiques du milieu. Les relations entre la physico-chimie et la géologie seront abordées au chapitre 6. Enfin, le chapitre 7 consistera en une analyse globale et intégrée de l'ensemble des variables du milieu (physiographie, géologie et végétation).

2. CADRE BIOPHYSIQUE DE L'ÉTUDE

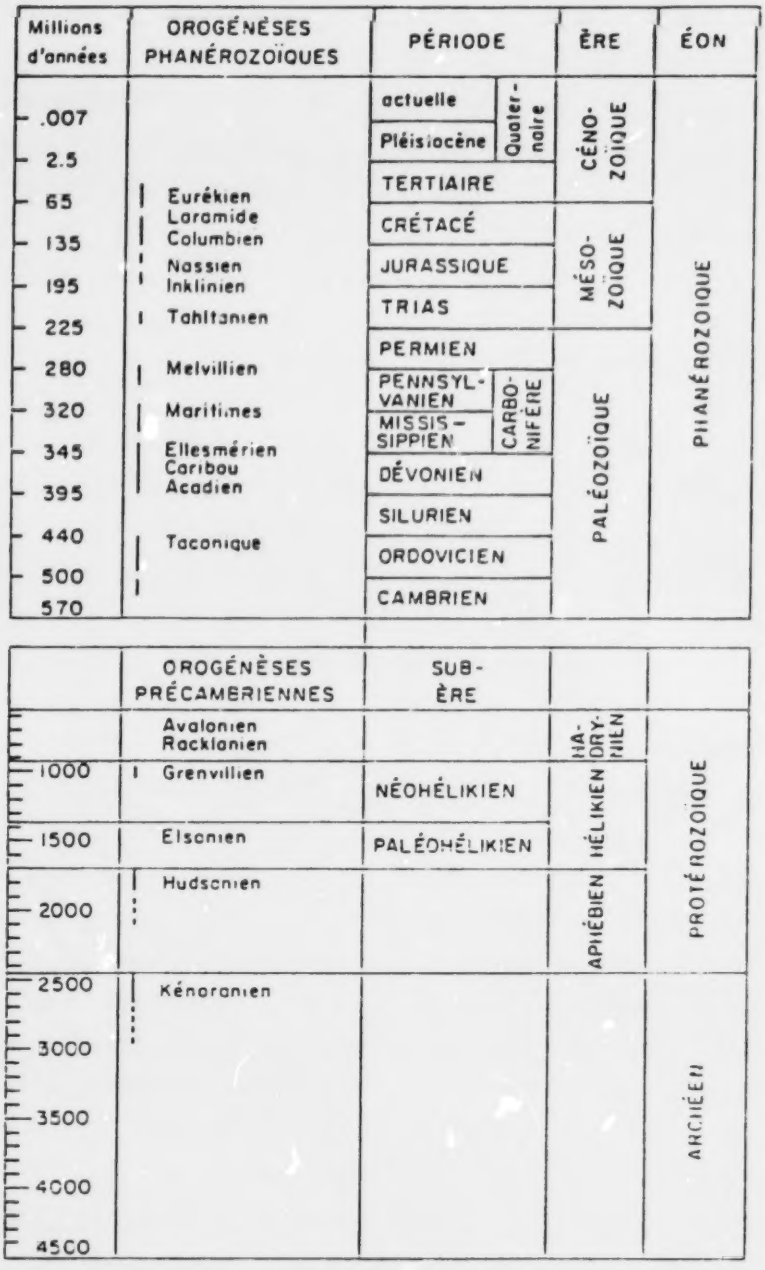
La région étudiée est entièrement située dans le Bouclier canadien, soit dans sa partie sud-est communément appelée Plateau laurentien ou Chaîne des Laurentides. "Le relief général n'accuse pas de formes réellement contrastées; la surface, vestige d'une ancienne pénéplaine ou "pédiplaine", s'ondule légèrement pour donner des altitudes de 250 à 750 mètres" (Rousseau, 1974). Cette surface de plateau est dominée par deux massifs: le massif de la réserve des Laurentides au nord de Québec qui culmine à 1165 m et le Mont Tremblant au nord-ouest de Montréal qui atteint 967 m d'altitude (Bobée et al., 1983).

La surface du plateau est entaillée par quelques fractures d'échelle régionale telles que le fjord de la rivière Saguenay, la vallée de la rivière Jacques-Cartier, la vallée de la rivière Saint-Maurice et la vallée de la rivière Gatineau. De plus, une multitude de petites fractures locales quadrillent la surface de ce plateau.

Le Plateau laurentien est le résultat d'une des quatre orogénèses du Précambrien, soit l'orogénèse grenvillienne, datant d'environ 950 millions d'années (figure 2.1). Les roches de la province de Grenville s'étendent sur une largeur d'environ 320 km en bordure nord du fleuve et du golfe Saint-Laurent et couvrent environ 30 à 40% de la superficie du Québec.

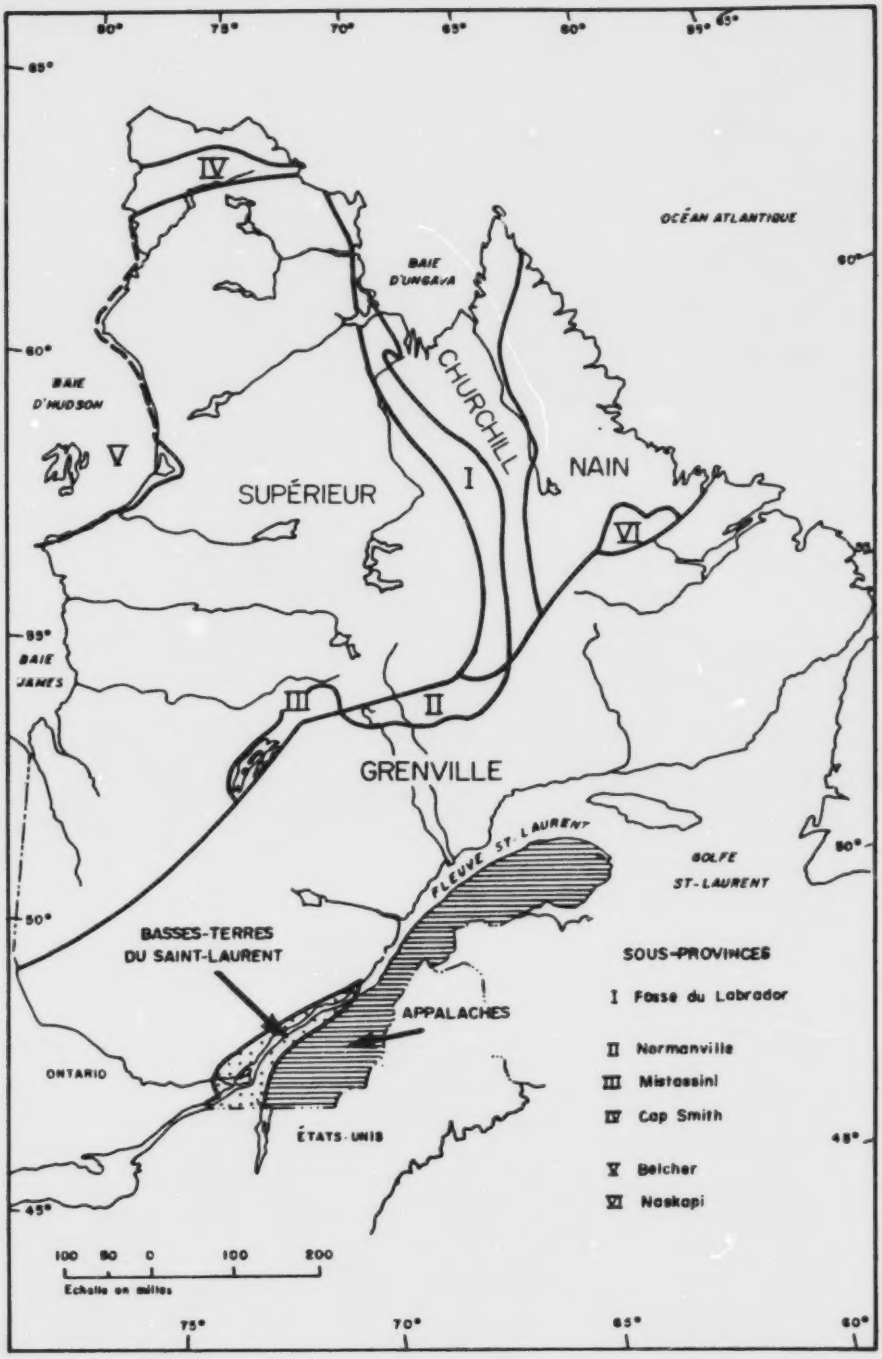
2.1 Géologie et dépôts meubles des hautes terres laurentiennes

Les roches du Précambrien, période la plus ancienne et la plus longue de l'histoire géologique, occupent la plus grande partie du Québec et forment le Plateau laurentien ou hautes terres laurentiennes. Les caractères minéralogiques et structuraux de la plupart de ces roches correspondent à des phénomènes qui se seraient produits à des températures et à des pressions élevées. Dans la partie sud de la province de Grenville (figure 2.2), les formations rocheuses ont une direction générale nord-nord-est tandis que dans la partie nord elles ont une direction nord-est et constituent une zone intermédiaire entre cette province et celle du Supérieur.



Source: Gouvernement du Canada (1974)

FIGURE 2.1: Position relative de l'orogénèse Grenvillienne dans l'histoire géologique.



Source: Gouvernement du Canada, 1964

FIGURE 2.2: Divisions géologiques du Québec

La lithologie est caractérisée surtout par des roches plutoniques (granites et roches apparentées); on trouve aussi des roches éruptives, sédimentaires et métamorphiques. Ces roches sont, en majorité, cristallines et peu altérables.

La plupart d'entre elles sont des roches ignées (anorthosites, gabbros, granites, syénites) et des roches métamorphiques telles que des gneiss, des paragneiss et des quartzites.

Les roches plutoniques (synonyme de ignées intrusives) sont issues de la cristallisation lente d'un magma à une certaine profondeur et sont en général grenues, à texture équante et homogène dans les grands volumes. Les roches métamorphiques proviennent, pour leur part, de la transformation d'une roche à l'état solide ou plastique du fait d'une élévation de température ou de pression, avec cristallisation de nouveaux minéraux et acquisition de textures et structures particulières, sous l'infuence de conditions physiques ou chimiques différentes de celles ayant présidé à la formation de la roche originale (Foucault et Raoult, 1980). Les roches originales impliquées peuvent être d'origine plutonique, sédimentaire ou métamorphique.

Le territoire laurentien a reçu son modelé définitif durant la dernière grande glaciation du Quaternaire, terminée depuis environ 11 000 ans. Le déplacement ou écoulement glaciaire se faisait alors vers le sud ou sud 10°E. De cette glaciation résulta une transformation de la physiographie du plateau par la déposition de la moraine de fond ou till (dépôts meubles). Ce matériel hétérométrique, constitué de débris rocheux et d'une matrice généralement sableuse, provient du rabotage et du décapage, par le glacier, de la surface du plateau laurentien.

Les dépôts meubles créèrent, sur cette vaste étendue de roches acides, des conditions favorables à la formation des lacs et des tourbières en modifiant le système hydrographique, en barrant les vallées et en causant la stagnation de l'eau dans les dépressions et les plaines.

L'épaisseur moyenne des dépôts non-consolidés varie de 2 à 8 mètres. Cependant, dans le fond des vallées ou fractures, cette épaisseur peut

atteindre plusieurs dizaines de mètres. Au contraire, sur les plus hauts sommets et sur les pentes fortes ou abruptes, l'épaisseur du till varie de 0 à 2 mètres.

Les dépôts morainiques reflètent généralement la nature de la roche en place sur laquelle ils ont été déposés. Comme la roche en place est composée presque essentiellement de roches ignées (plutoniques) et métamorphiques, cette région fait partie d'un vaste territoire classifié comme une zone ayant une sensibilité élevée aux effets des précipitations acides.

Shilts (1981), dans son étude sur la sensibilité de la roche en place aux précipitations acides, décrit les phénomènes glaciaires et leurs conséquences comme suit:

> "Au Canada, les glaciers ont modifié le rapport simple existant entre les sols et la roche en place en raison des débris charriés d'un type de roche en place à un endroit où la composition de la roche peut être différente".

Comme cette région a été soumise à plusieurs épisodes de glaciation et comme l'on retrouve à certains endroits du plateau des lambeaux de roches carbonatées, on peut alors prétendre que le transport glaciaire du till peut modifier les schémas de sensibilité uniquement dérivés de l'information sur la nature de la roche en place.

2.2 Les sols

La région étudiée se situe dans la zone pédoclimatique la plus étendue au Québec appelée "zone des podzols". En effet, la majeure partie des sols du Québec présentent un stade de podzolisation très avancé (Grandtner, 1966). Ceux-ci couvrent presque entièrement les hautes terres laurentiennes. Typiquement, les sols podzoliques se sont formés sur des matériaux parentaux acides de texture grossière à moyenne, sous une végétation de forêt ou de bruyère, en climat frais à très froid, humide à perhumide (Gouvernement du Canada, 1978).

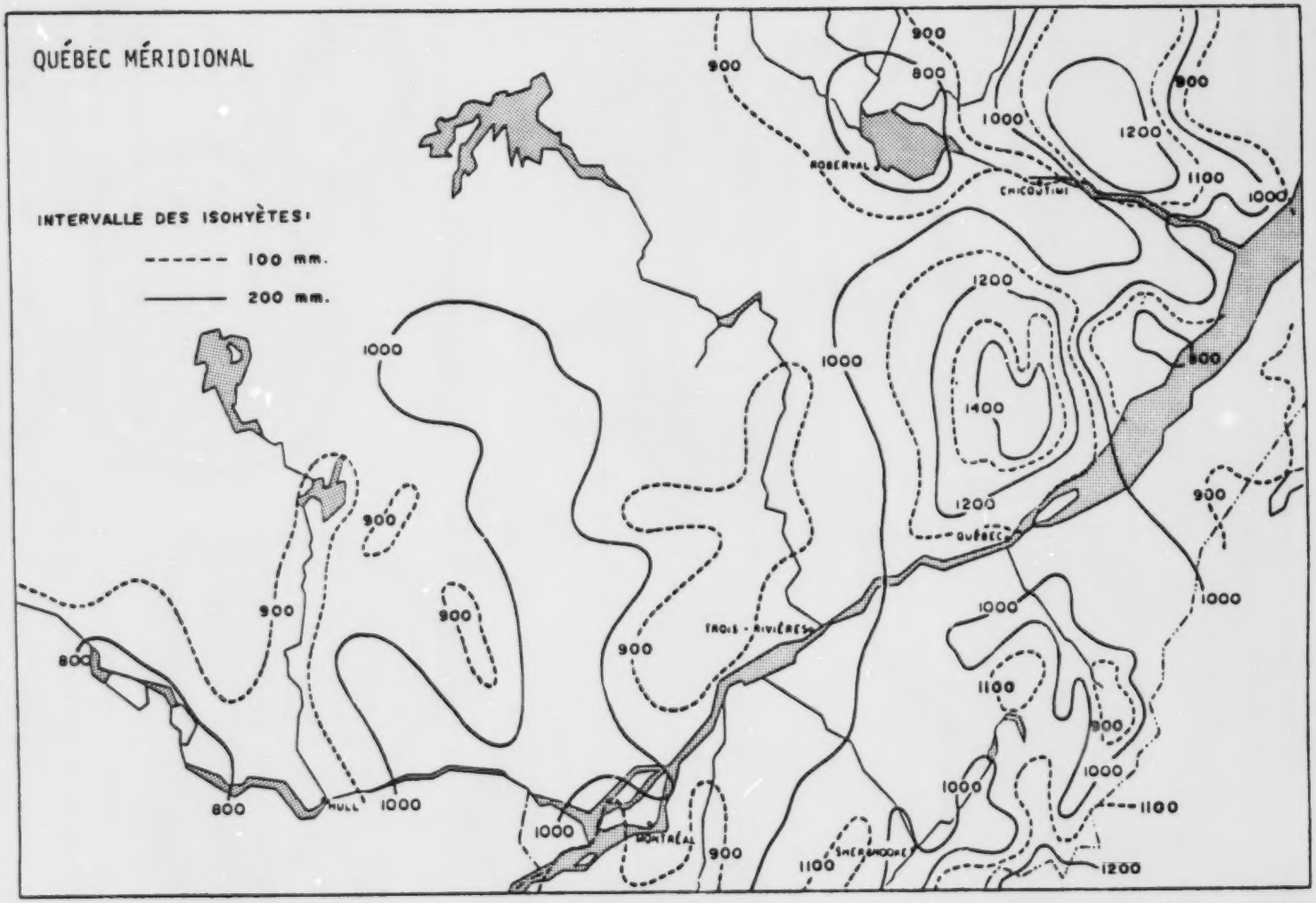
Malheureusement, il y a très peu de données et d'études disponibles, relatives aux sols du Plateau laurentien. La plupart des études portant sur les sols du Québec ont été faites dans un but bien précis, soit la caractérisation des sols agricoles des basses-terres du Saint-Laurent. Il nous a donc été impossible d'inclure dans l'étude des données concernant les sols des bassins versants sélectionnés.

2.3 Le climat du Québec méridional

La température annuelle du climat québécois montre une décroissance graduelle du sud au nord ainsi que des vallées et des basses-terres vers les plateaux et les massifs montagneux. Il y a également une opposition entre le climat de l'est et de l'ouest du Québec. Ces variations de température traduisent donc des conditions géographiques et des situations météorologiques variées. De plus, selon Wilson (1971), des facteurs comme les différences de sol, l'angle et l'orientation des pentes, la forme et l'altitude de la surface, le degré d'exposition au vent et aux précipitations, aux nuages et au brouillard, la nature de la végétation, la forme et la taille des défrichements, la proximité des surfaces d'eau, se combinent eux aussi pour donner une mosaïque de climats locaux.

En octobre, au Québec septentrional, et en novembre dans la partie méridionale la température moyenne descend sous le zéro Celsius. La température quotidienne moyenne de janvier varie entre -15,0°C pour le parc des Laurentides au nord de Québec et -12,5°C au nord de Hull. L'hiver au Québec est partout très froid avec des températures minimales de janvier de -22.5°C à La Tuque, -17,5°C près de Hull et -22,5°C autour de Ste-Agathe des Monts (Houde, 1978).

Les températures moyennes de juillet, mois le plus chaud de l'année, sont comprises entre 15,0°C et 21,0°C sur le Plateau laurentien, à 15,0°C au nord de Québec, à 20,8°C au nord de Hull et à 17,5°C autour de La Tuque. En résumé, le bouclier laurentien, de juin à août enregistre de faibles variations spatiales des températures moyennes.



Source: Houde (1978)

FIGURE 2.3: Moyenne des précipitations totales annuelles 1941 - 1970 (en mm)

Il pleut et neige beaucoup dans le Québec méridional. La précipitation totale annuelle varie de 900 mm dans la région de Montréal et de la Mauricie, à plus de 1400 mm sur les hauts sommets des Laurentides (figure 2.3). Les influences majeures qui régissent la répartition mensuelle des précipitations tiennent à l'origine des dépressions, à la proximité des sources d'humidité et à l'orientation des reliefs (Houde, 1978). De plus, localement, la distribution moyenne de la pluie estivale s'organise en fonction de l'altitude. On observe une augmentation d'environ 10 mm d'eau par 150 m d'altitude. L'exposition ou l'orientation du relief est le second facteur; les versants aux vents reçoivent une plus grande quantité de pluie.

La majorité des précipitations tombent durant les mois d'été. En effet, au cours de ces mois, le territoire québécois est traversé plus fréquemment par des systèmes atmosphériques chauds et humides en provenance du sud-ouest. L'ouest du Québec est fortement touché par ces systèmes. Même si l'hiver demeure la période la plus sèche il neige abondamment de novembre jusqu'en avril. Le contraste dans la hauteur des précipitations mesurées entre l'est et l'ouest est plus marqué sur la carte de la neige que sur celle de la précipitation totale. On enregistre aussi une décroissance de l'est vers l'ouest dans les précipitations hivernales. Ce contraste est surtout dû au fait que les cyclones d'hiver d'origine maritime affectent davantage l'est du Québec et lui laissent d'importantes accumulations de neige (jusqu'à 500 cm au nord-nord-est de Québec). L'ouest par contre avec une couche nivale moyenne d'environ 300 cm est plus souvent balayé par les dépressions de l'ouest ou du nord- ouest, de caractère continental, peu susceptible de se modifier lors de leurs passages au-dessus des eaux intérieures (Grands lacs), gelées en tout ou en partie. La fraction nivale constitue autour de 25 à 30% de la précipitation totale moyenne annuelle dans la partie sud-ouest de la province et atteint une valeur de 30 à 35% dans la réserve des Laurentides.

Le climat du Québec méridional est donc, dans l'ensemble, un climat continental, caractérisé par un grand écart des températures extrêmes, par l'abondance des précipitations et par l'influence de la couche de neige hivernale.

2.4 La végétation du Québec méridional

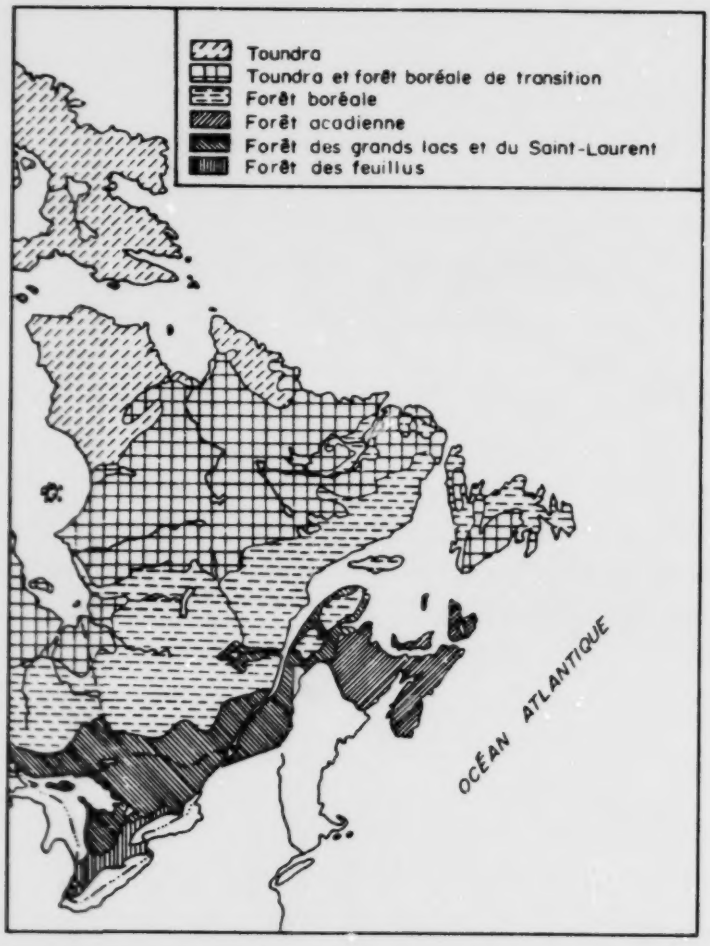
L'étude de Rowe (1972), utilisant des données descriptives primaires, a servi d'ouvrage de référence; on y délimite les principales zones géographiques caractérisées par une grande uniformité végétale dans l'apparence et dans la répartition de l'essence dominante. Aux huit régions forestières décrites par Rowe, on a ajouté quatre nouvelles régions (Gouvernement du Canada, 1978), afin de mieux faire ressortir les différences physiographiques du relief québécois et de mieux délimiter les variations spatiales de l'apparence et de la composition des groupements végétaux associés.

On retrouve au Québec quatre de ces douze régions forestières (figure 2.4). Dans notre étude, la région forestière boréale et la région forestière mixte du sud-est (forêt des Grands lacs et du Saint-Laurent) sont considérées.

2.4.1 La région forestière boréale

La région forestière boréale est la région la plus étendue des régions forestières du Canada. Elle forme une ceinture continue, s'étendant depuis l'ouest de Terre-Neuve et la côte du Labrador jusqu'aux montagnes Rocheuses à l'ouest et vers le nord-ouest jusqu'à la frontière de l'Alaska.

A dominance de conifères, l'épinette noire et l'épinette blanche en sont les principales espèces. Les autres conifères, moins prédominants mais tout aussi représentatifs sont le tamarac (mélèze), le sapin baumier et le pin gris. Cette région comprend également des essences feuillues, notamment le bouleau à papier, le tremble et le peuplier baumier. Dans la partie est, on note la présence, en grand nombre, des espèces particulières à la forêt des Grands lacs et du Saint-Laurent, tels le pin blanc, le pin rouge, le merisier, l'érable à sucre, le frêne noir et le cèdre blanc. La région forestière boréale est subdivisée en quarante-cinq sections ou zones géographiques qui se distinguent des autres par la végétation et la physiographie. A l'intérieur des limites de notre étude, nous retrouvons deux de ces



Source: Gouvernement du Canada (1978)

FIGURE 2.4: Régions forestières du Québec
(modifiée à partir de la carte de Rowe,1972)

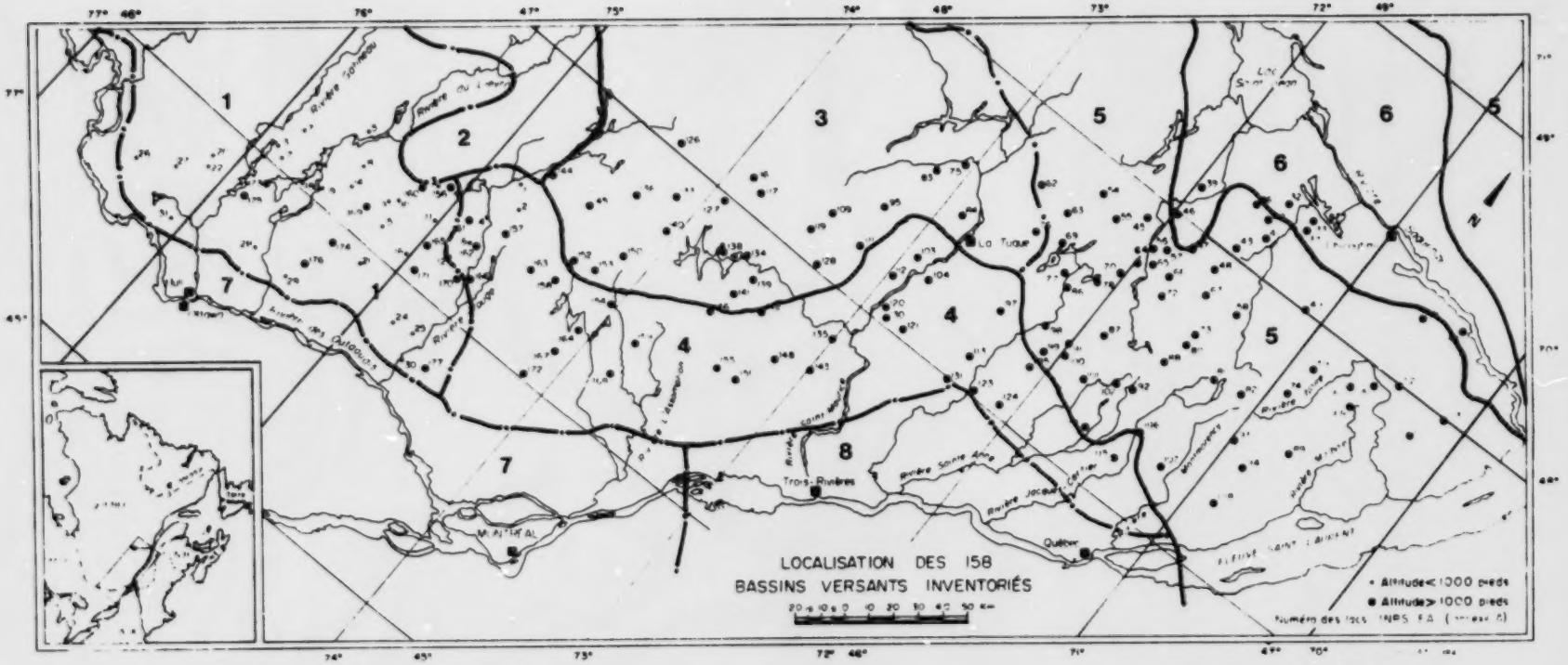


FIGURE 2.5: Sections forestières du Québec méridional

Source: Rowe, 1972

1 Centre de l'Outaouais
2 Algonquin-Pontiac
3 Missinaibi-Cabonga
4 Laurentienne
5 Laurentides-Onatchiway
6 Saguenay
7 Haut Saint-Laurent
8 Moyen Saint-Laurent

——·—— Limite des sections
——————— Limite des régions

sections (figure 2.5) que nous décrirons brièvement. La majorité des descriptions des sections forestières qui vont suivre sont tirées presque intégralement de Rowe (1972).

a) La section Laurentides-Onatchiway (section 5, figure 2.5)

Cette section comprend les hautes terres des Laurentides au nord et nord-est de Québec. Les forêts sont surtout peuplées de conifères. Le sapin baumier prédomine sur le flanc des collines et en d'autres stations écologiques humides et bien drainées, tandis que l'épinette noire prédomine sur les plateaux au sol mince et sur les terres à mauvais drainage. On trouve partout, mais en petit nombre, l'épinette blanche. Le bouleau à papier est le feuillu qui s'associe communément avec le sapin et l'épinette. Le tremble et le pin gris sont des essences secondaires qui prédominent là où il y a eu des incendies fréquents, surtout autour de la dépression du lac Saint-Jean. Le peuplier baumier, le cèdre blanc, le pin blanc et le tamarac sont communs en certains endroits tandis que plusieurs des feuillus d'ombre, par exemple l'érable à sucre et le merisier, vivent à basse altitude dans les parties sud.

b) La section Missinaibi-Cabonga (section 3, figure 2.5)

Elle s'étend le long du haut du versant sud des Laurentides (Québec), depuis la partie centrale de la vallée du Saint-Maurice jusqu'à la rive sud du lac Abitibi, et de là, vers l'ouest jusqu'à un point situé juste au nord-est du lac Supérieur. La forêt prédominante est mixte, constituée d'une association de sapin baumier, d'épinette noire et de bouleau à papier et parsemée d'épinette blanche et de tremble; la présence de ces deux espèces semble caractéristique des pentes moyennes. Çà et là, et en particulier sur les sols à texture plus lourde et au haut des pentes exposées au nord, on trouve des bosquets ou des sujets isolés d'érable à sucre et de merisier; et cela est particulièrement vrai pour le secteur québécois. Sur les rives rocheuses de même que sur les hauteurs, on trouve quelques pins blancs et pins rouges, même si les arbres de ces espèces ont presque tous été extraits il y a plusieurs décennies par des coupes.

Sur les terrasses de sable au bord des rivières, le pin gris domine; il s'associe aussi avec l'épinette noire sur les sols rocheux pauvres. L'épinette noire et le tamarac recouvrent de vastes superficies de sols organiques humides, et le cèdre blanc accompagne l'épinette noire dans une autre association commune des basses-terres. On trouve fréquemment des frênes noirs et des ormes blancs dans cette section; l'épinette rouge est disséminée le long de la limite sud du Québec.

2.4.2 La région forestière mixte du sud-est (région forestière des Grands lacs et du Saint-Laurent)

Le long des Grands lacs et de la vallée du Saint-Laurent s'étend une forêt de nature mixte caractérisée par le pin blanc, le pin rouge, la pruche du Canada et le bouleau jaune. Associées à ces espèces, on retrouve certaines essences dominantes à larges feuilles telles que l'érable à sucre, l'érable rouge, le chêne rouge, le tilleul d'Amérique et l'orme d'Amérique. On y retrouve également des essences très répandues comme le thuya occidental et le peuplier à grandes dents, et à un moindre degré le hêtre américain, le chêne blanc, le noyer cendré et le frêne blanc. Des essences boréales comme l'épinette blanche, l'épinette noire, le sapin baumier, le pin gris, le peuplier faux-tremble, le peuplier baumier et le bouleau à papier sont éparpillées dans cette zone forestière. La région forestière mixte du sud-est est elle aussi subdivisée en sections ou zones géographiques. Des seize sections décrites par Rowe (1972), trois seulement se retrouvent à l'intérieur des limites de l'étude. Il s'agit de la section forestière du centre de l'Outaouais, la section forestière laurentienne et la section forestière du Saguenay (figure 2.5).

a) La section forestière du centre de l'Outaouais (section 1, figure 2.5)

Les peuplements des hautes terres sont habituellement composés d'érables à sucre, de hêtres, de merisiers, d'érables rouges et de

pruches, presque toujours accompagnés de pins blancs et de pins rouges. Les deux dernières essences, en association avec le pin gris, caractérisent aussi les sommets secs et les bas fonds sableux. Partout on retrouve, en nombres variés, l'épinette blanche, le sapin baumier, le tremble, le bouleau à papier, le chêne rouge et le bois blanc (tilia americana).

Les marécages, à peuplements feuillus ou mixtes, auxquels se mêlent le cèdre blanc, le tamarac, l'épinette noire, le frêne noir, l'érable rouge et l'orme blanc sont plutôt communs. De plus, par endroit, on trouve des essences plus australes impropres à cette région telles que le noyer tendre, le caryer à noix amères, le chêne à gros glands, le frêne blanc et le cerisier d'automne.

b) La section forestière laurentienne (section 4, figure 2.5)

La section forestière laurentienne constitue une zone de transition entre la région boréale et la région des feuillus. Sa limite sud est une limite géologique caractérisée par le passage brusque des roches précambriennes aux roches sédimentaires et aux dépôts postglaciaires de la vallée du Saint-Laurent. Sa limite nord coïncide approximativement avec la limite de l'aire de l'épinette rouge et du chêne rouge.

Le couvert forestier ressemble beaucoup à celui de la région forestière acadienne. Les collines sont généralement couvertes de peuplements de feuillus d'ombre et les vallées de peuplements mixtes et résineux. Les principales essences des flancs de collines sont le merisier, l'érable à sucre, l'épinette rouge, le sapin baumier, l'érable rouge et le bouleau à papier. La pruche, le hêtre américain et l'épinette blanche sont dispersés partout. Autrefois, la région contenait de grands pins blancs; cette essence y est encore présente mais à un degré moindre. L'épinette noire, accompagnée du cèdre blanc, du tamarac, ou parfois du frêne noir, occupe les hautes-terres mal drainées et les tourbières des terres-basses.

c) La section forestière du Saguenay (section 6, figure 2.5)

La section forestière du Saguenay a peu d'importance pour notre étude puisqu'elle n'englobe qu'environ 5% des bassins versants inventoriés. Mentionnons tout de même que les bassins versants appartenant à cette section pourraient être associés à la région forestière boréale (section Laurentides-Onatchiway) parce que la majorité d'entre eux sont localisés à proximité de sa limite nord-est. En général, la topographie et les caractéristiques de la végétation de ces bassins versants sont les mêmes, c'est-à-dire: haut relief accidenté, dominance de l'épinette noire et blanche et présence d'essences feuillues telles que le bouleau à papier, le tremble et le peuplier baumier.

Une description détaillée des différents milieux biophysiques rencontrés dans les 158 bassins versants inventoriés a été effectuée et a mise en évidence la très grande diversité des variations physiographiques, géologiques, pédologiques, climatiques et biogéographiques du territoire dans lequel on les retrouve. On s'est donc restreint à décrire, par région homogène, la complexité biophysique du territoire tout en soulignant et caractérisant les variations dominantes.

3. DONNÉES

L'inventaire des données géologiques et biophysiques des 158 bassins versants de l'étude a été réalisé dans le but d'examiner l'importance des conditions climatiques, physiographiques, géologiques et végétatives dans le contrôle du niveau d'acidité des lacs. A cette fin, le maximum d'informations pertinentes (descriptives et quantitatives) a été recueilli (tableau 3.1).

Différentes étapes ont été nécessaires pour l'identification, la cueillette, l'analyse et l'interprétation de ces données.

La première étape a consisté à recueillir toute l'information déjà existante (concernant la physico-chimie de l'eau, la géologie et la végétation) et à faire la compilation de la documentation disponible.

Une photo-interprétation préliminaire des bassins versants nous a permis d'identifier, de délimiter et de cartographier leurs principales caractéristiques morphologiques, hydrographiques et forestières. On a identifié en même temps l'épaisseur et les types de dépôts et on a procédé à l'évaluation qualitative et quantitative des pentes et du drainage. Enfin on a procédé au choix des sites à visiter par hélicoptère.

Les relevés de terrain ont été exécutés et complétés au cours du mois de juin 1983. Ils comprennent le survol et la prise de photographies des bassins versants, la vérification de la précision et de l'exactitude des données recueillies lors de la photo-interprétation préliminaire, la visite de sites prédéterminés (cas problèmes) et la prise de notes et d'informations supplémentaires.

Après chaque visite de bassin versant, on a procédé à la compilation, aux corrections et au transfert des anciennes et nouvelles données sur les acétates de la première photo-interprétation. La normalisation et la quantification des données descriptives a été faite en éliminant les informations redondantes et en mesurant toutes les superficies délimitées sur acétates. Par la suite, on a procédé à la mise en forme des données et à leur informatisation.

Tableau 3.1: Données inventoriées pour l'étude: types, sources et utilité de l'information.

Types de données	Information recueillie	Principales sources	Utilité de l'information
Physiographie	Coordonnées (longitude, latitude) Altitude (lac)	- Carte 1:20,000	L'altitude élevée favorise la formation de nuages et par conséquent influence la quantité de précipitation reçue par une région
	Superficie du bassin versant (SBV) Superficie du lac (SLC) Superficie des tourbières (STB)	- Planimétrie à partir des photos aériennes	Étude des rapports de superficie. Ceux-ci pourraient être en relation directe avec la charge acide atmosphérique totale reçue dans le bassin versant (input), la charge acide arrivant au lac et le taux de renouvellement de l'eau du lac (output).
	SBV/SLC SBV/STB	- Rapport de superficies	
Géologie	Nature géologique de l'assise rocheuse pour chaque bassin	- Cartes des gîtes minéraux du Québec	Les caractéristiques chimiques de l'assise rocheuse déterminent en grande partie l'impact de chaque type de roche sur la qualité de l'eau des précipitations
		- Ministère de l'Énergie et des Ressources (gouv. du Québec): Rapports géologiques	
		- Commission géologique du Canada	
Dépôts meubles	- Type de dépôts meubles (superficie) - Épaisseur - Pente - Drainage	- Photo-interprétation et levés de terrain	Sert à réévaluer les prédictions de vulnérabilité des bassins versants basées uniquement sur la géologie de l'assise rocheuse. On doit tenir compte de facteurs tels que l'épaisseur, la pente, le drainage et le type de dépôts meubles influençant le temps de contact de l'eau dans le bassin versant
Végétation	Type de couvert arboré: densité et superficie	- Gouvernement du Québec, Service de l'inventaire forestier et/ou photo-interprétation, levés de terrain	La végétation est une variable intégratrice d'un milieu donné; elle reflète généralement les conditions climatiques, hydrologiques et pédologiques d'une région
	Perturbations: - naturelles: feu, chablis, épidémie, barrage de castor - anthropiques: coupe partielle coupe totale, chemin forestier, barrage, chalet		Utile pour mesurer les effets du couvert végétal et des perturbations sur la qualité de l'eau des lacs à l'intérieur des bassins versants
Climat	Température: - moyenne annuelle	- Gouvernement du Québec, Ministère des Richesses naturelles, Service de météorologie	Stress printanier plus grand si la fraction nivale est plus élevée et si le temps du dégel est plus court
	Précipitation: - moyenne annuelle; fraction nivale	- Gouvernement du Canada, Service météorologique du Canada,	La qualité des précipitations (apports de sulfates) a une relation possible avec la qualité de l'eau
			Le climat détermine les types de sol et influence la végétation
Qualité de l'eau des lacs	Données relatives à la physico-chimie de l'eau des lacs: Concentration des constituants	Rapport: Bobée et al. (1983)	Permet d'évaluer la qualité de l'eau des lacs soit l'acidité, le pouvoir tampon, la minéralisation

4. ANALYSE DESCRIPTIVE DES VARIABLES BIOPHYSIQUES ET GÉOLOGIQUES

Ce chapitre est une analyse succincte de l'information fournie par chacune des variables considérées dans cette étude. Les variables sont abordées selon le genre d'information qu'elles fournissent (variables physiques, variables concernant la végétation et variables géologiques).

4.1 Variables physiques

Les variables physiques analysées dans cette section se répartissent en deux catégories: celles de nature physiographique inventoriées dans l'étude précédente de Bobée et al. (1983) et celles concernant l'épaisseur et la nature des dépôts meubles.

4.1.1 Variables physiographiques

Les variables mesurées sont la longitude, la latitude, l'altitude du lac, la superficie du bassin versant, la superficie du lac, le rapport superficie du bassin versant / superficie du lac, la superficie de tourbière et la précipitation annuelle moyenne (1931-1960). La figure 4.1 présente les histogrammes de fréquence des six variables pour l'ensemble de la région étudiée. Les principales caractéristiques statistiques (moyenne, écart-type, coefficient de variation, médiane, minimum, maximum) de ces variables sont données au tableau 4.1.

L'altitude des lacs varie entre 168 et 975 m avec une valeur moyenne de 438 m (tableau 4.1). Les lacs d'altitude élevée (600 m) sont situés au nord-est de la région étudiée, principalement dans la réserve des Laurentides au nord de Québec, tandis que les lacs de faible altitude ($<$ 300 m) se retrouvent dans la partie sud-ouest située dans la vallée de l'Outaouais (figure 4.2).

La précipitation annuelle moyenne totalise entre 85 et 165 cm (tableau 4.1). La configuration spatiale obtenue en classant les lacs

( ) Nombre de bassins versants

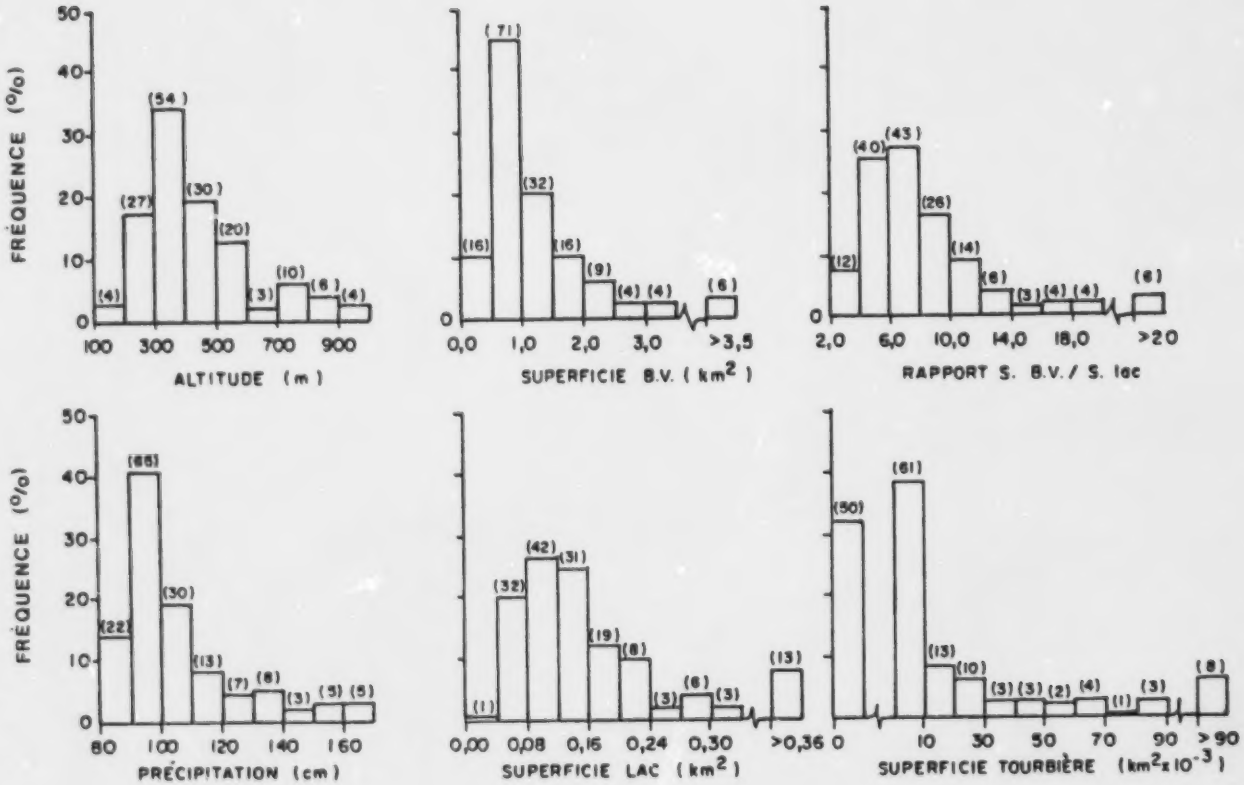


FIGURE 4.1: Histogrammes de fréquence des variables physiographiques de la région étudiée.

Tableau 4.1: Statistiques descriptives des variables hydrographiques des 158 bassins versants de la région d'étude

variable	moyenne	écart-type	coefficient de variation (%)	médiane	minimum	maximum
altitude (m)	438	179	40,7	396	168	975
superficie du bassin versant (km^2)	1,30	1,21	92,9	0,93	0,26	10,9
superficie du lac (km^2)	0,165	0,117	70,7	0,13	0,03	0,70
superficie de tourbière (km^2)	0,020	0,037	184	0,007	0,00	0,22
précipitation annuelle moyenne (cm)	105,6	19,8	18,8	98,8	85,0	165,0
$\frac{\text{(superf. B.V.)}}{\text{(superf. lac)}}$	8,69	5,99	69,0	6,95	2,42	45,3

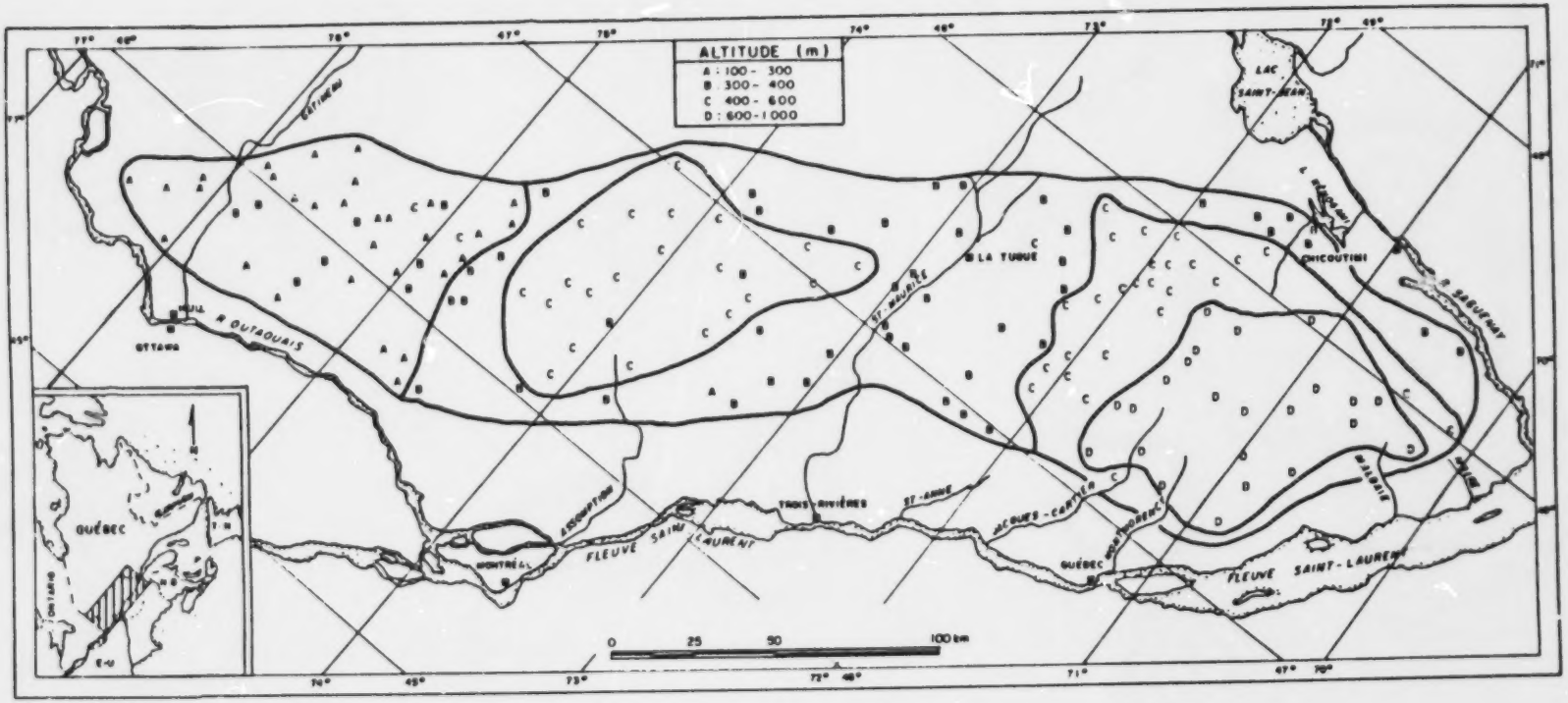


FIGURE 4.2: Classification des bassins versants selon l'altitude du lac.

selon les valeurs de précipitation (figure 4.3) ressemble à celle obtenue en classant les lacs selon l'altitude, sauf pour les valeurs de précipitation les plus faibles (entre 80 et 90 cm) qui se retrouvent plutôt avec les lacs d'altitude variant entre 300 et 400 m. Dans la vallée de l'Outaouais où se retrouvent les lacs de plus faible altitude, la précipitation se situe à des valeurs comprises entre 90 et 100 cm; celles-ci se situent légèrement en dessous de la moyenne de la région étudiée (105.6 cm).

Puisque tous les lacs choisis sont situés à la tête des bassins, la superficie de leur bassin de drainage est généralement faible; 119 (75%) bassins versants ont une superficie inférieure à 1,5 km^2 (figure 4.1), tandis que six bassins versants seulement ont une superficie supérieure à 3,5 km^2. Les lacs sont également de faible taille, 67% des lacs ayant une superficie inférieure à 0,16 km^2 (figure 4.1). Le rapport superficie du bassin versant /superficie du lac obtenu varie entre 2,4 et 45,3 (tableau 4.1), mais se situe principalement entre 4 et 10 (figure 4.1).

Lors de la sélection des lacs, un des critères était l'absence de tourbières sur le bassin versant. Les superficies de tourbières sur les bassins sont généralement très faibles, 70% (110) des bassins versants ayant des superficies de tourbières inférieures ou égales à 0,010 km^2 (figure 4.1). On observe cependant que neuf bassins versants ont des superficies totales de tourbières supérieures à 0,9 km^2.

4.1.2 Variables concernant la nature et l'épaisseur des dépôts meubles

Cet ensemble de variables consiste en la mesure sur le bassin versant de la superficie occupée par différents types de dépôts selon différentes classes de pente et de drainage. Les dépôts qui y sont distingués comprennent:

- affleurement rocheux (ROC)
- affleurement rocheux et mince pellicule de till (R+TM)

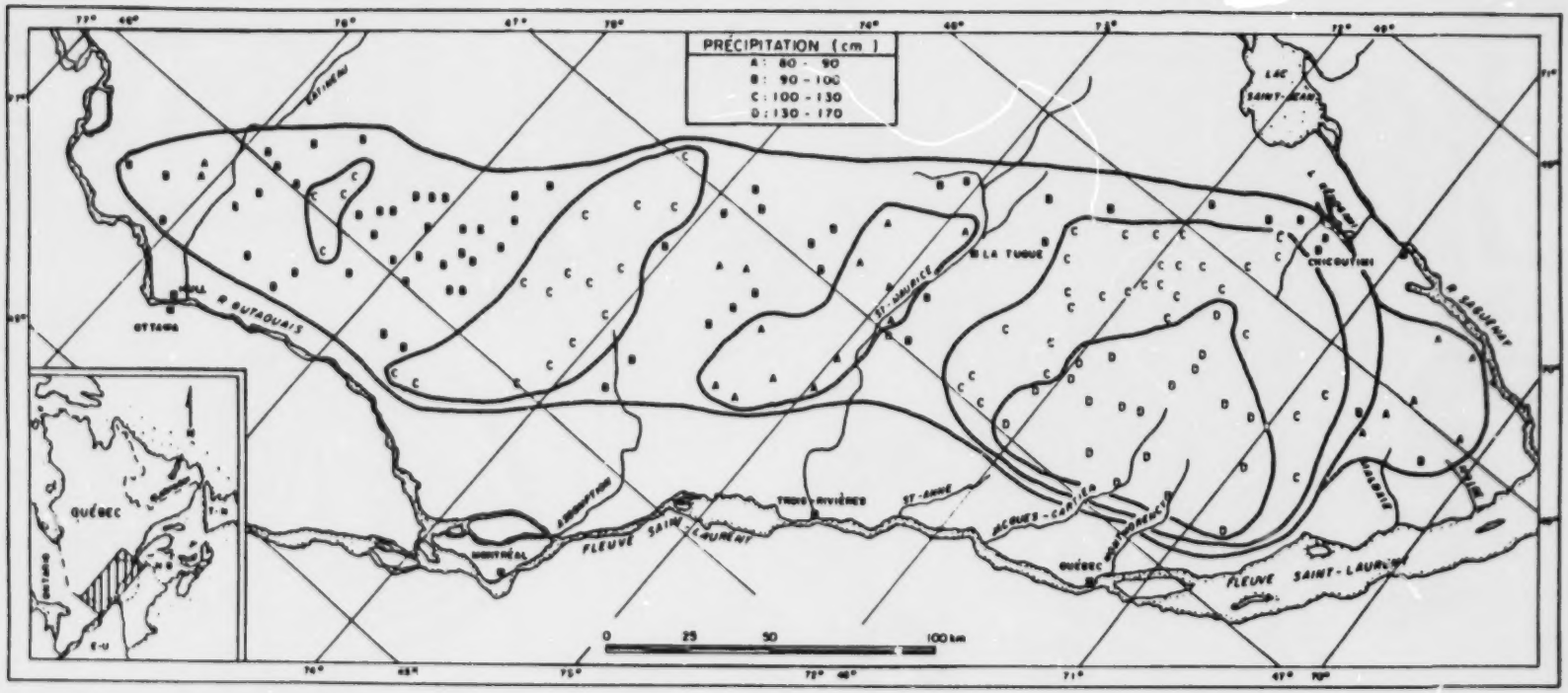


FIGURE 4.3: Classification des bassins versants selon la précipitation moyenne annuelle.

- till d'épaisseur inférieure à 0,5 m sur assise rocheuse (TM/R)
- pellicule de till dont l'épaisseur varie entre 0,5 et 1 m (TM)
- till dont l'épaisseur est plus grande que 1 m (TE)
- dépôts organiques dont l'épaisseur dépasse 30 cm (ORG)
- sable et gravier (S + G)

Les types de dépôts sont classés selon les classes de pente suivantes:

1- terrain plat (0 à 2%)
2- pente douce (2 à 10%)
3- pente moyenne (10 à 30%)
4- pente forte (30 à 80%)
5- pente très forte à abrupte (>80%)

Les types de dépôts sont classés selon les classes de drainage suivantes:

1- excessif, rapide
2- très bon
3- bon
4- modéré
5- mauvais
6- très mauvais

Sur chacun des bassins versants, on a déterminé l'importance relative (en termes de superficie) de chacune des classes présentes. Si on examine la répartition sur la région étudiée des unités appartenant aux différentes classes, on constate au tableau 4.2 que les unités de superficie se retrouvent sur un nombre restreint de combinaisons dépôt-pente-drainage.

Ce dénombrement des différentes classes permet de faire ressortir la présence d'une relation entre le type et l'épaisseur du dépôt et la pente, ainsi qu'entre le type et l'épaisseur du dépôt et le drainage. En effet, pour chacun des types et épaisseur de dépôts, à l'exception

Tableau 4.2: Répartition des unités de superficie ≥0,1% du bassin versant selon le type et l'épaisseur du dépôt, la pente et le drainage.

Pente	Drainage	dépôts						
		ROC	R+TM	TM/R	TM	TE	ORG	S+G
1	1							1
	2					1		5
	3					4		2
	4			1	6	107	1	5
	5					4	107	
	6							
2	1							
	2			1				5
	3			21	74	104		4
	4			3	32	133		3
	5				1	6		
	6							
3	1	4	4	1				
	2		4	51	117	14		5
	3			25	112	58		
	4				8	6		
	5							
	6							
4	1	2	4					2
	2	1	13	137	45			2
	3							
	4							
	5							
	6							
5	1	30	63	2				
	2		68	25				
	3							
	4							
	5							
	6							

ROC: affleurement rocheux
R+TM: affleurement rocheux et mince pellicule de till
TM/R: till d'épaisseur inférieure à 0,5 m sur assise rocheuse
TM: pellicule de till dont l'épaisseur varie entre 0,5 et 1 m
TE: till dont l'épaisseur est plus grande que 1 m
ORG: dépôts organiques dont l'épaisseur dépasse 30 cm
S+G: sable et gravier

du sable et du gravier, on retrouve principalement les classes de pente et de drainage suivantes:

dépôt	ROC	R+TM	TM/R	TM	TE		ORG
pente	5	5	4	3	2	1	1
drainage	1	1,2	2	2,3	4,5	5	6

La présence d'une telle relation est facilement explicable; on s'attend, en effet, à ce que les affleurements rocheux se retrouvent principalement associés aux terrains de pente forte et de drainage très bon, et que les surfaces recouvertes d'une épaisse couche de till ou de matière organique soient des terrains à pente faible mal drainés.

Devant le faible nombre d'unités de superficie observées pour certaines combinaisons dépôt-pente-drainage, on a procédé à un regroupement de variables. Les classes de pente ont été ramenées à trois:

- douce (D): 1 et 2
- intermédiaire (I): 3
- forte (F): 4 et 5

Également, les classes de drainage ont été ramenées à trois:

- rapide (R): 1 et 2
- bon (B): 3
- mauvais (M): 4, 5 et 6

En procédant à ce regroupement et en éliminant les variables pour lesquelles on n'observe pas suffisamment de mesures (< 20), on arrive à retenir 16 variables représentant diverses combinaisons dépôt-pente-drainage. La liste de ces variables, leur nombre de mesures, ainsi que la moyenne et l'écart-type des mesures sont données au tableau 4.3.

Tableau 4.3: Nombre, moyenne et écart-type des superficies de bassin > 0,1% selon le type de dépôts, la pente et le drainage

type de dépôt[1-2]	nombre de bassins versants	moyenne	écart-type
ROC (F-R)	31	4,6	5,3
R+TM (F-R)	111	14,2	11,7
TM/R (D-B)	21	3,2	3,9
TM/R (I-R)	51	8,6	6,5
TM/R (I-B)	25	5,7	7,1
TM/R (F-R)	140	18,9	11,4
TM (D-M)	35	7,2	12,1
TM (D-B)	74	6,3	7,3
TM (I-R)	117	10,7	8,2
TM (I-B)	112	13,9	11,4
TM (F-R)	45	9,6	11,1
TE (D-M)	138	12,6	9,6
TE (D-B)	104	14,3	11,2
TE (I-R)	14	8,9	6,2
TE (I-B)	58	10,4	11,1
ORG (D-M)	108	1,9	2,2
ROC	31	4,8	5,5
R+TM	111	14,4	12,0
ROC+R+TM	115	15,2	13,3
TM/R	145	22,6	12,8
TM	154	26,0	15,1
TE	147	27,1	20,8
ORG	108	1,9	2,2
S+G	8	25,5	17,2

1 Pour une brève description des types de dépôt, cf. tableau 4.2
2 Les lettres entre parenthèses désignent la pente et le drainage

pente		drainage	
D	douce	R	rapide
I	intermédiaire	B	bon
F	forte	M	mauvais

Dans le but d'utiliser le maximum d'informations des données recueillies, on a également regroupé toutes les données concernant chaque type de dépôt indépendamment de la pente et du drainage. Le nombre de bassins versants pour lesquels on observe des mesures, la moyenne et l'écart-type des mesures sont fournis au tableau 4.3. En outre, devant le faible nombre de mesures obtenues pour la variable ROC, on a également regroupé les données pour les variables ROC et R+TM (tableau 4.3). La distribution de fréquence des différents types de dépôts selon leur superficie relative occupée sur le bassin est donnée au tableau 4.4.

Parmi les 16 variables se rapportant aux divers types de dépôts, pente et drainage, telles que données au tableau 4.3, on constate que seulement sept variables sont présentes sur plus de 65% (103) des bassins versants de la région étudiée. Ces variables sont R+TM (F-R), TM/R (F- R), TM (I-R), TM (I-B), TE (D-B), TE (D-M) et ORG (D-M). Une fois de plus on voit que les dépôts R+TM et TM/R sont caractérisés principalement par une pente forte et un drainage rapide, tandis que le dépôt ORG est associé à une pente douce et à un mauvais drainage. Les dépôts TM et TE sont également caractérisés par une classe de pente donnée (intermédiaire pour TM et intermédiaire à douce pour TE): par contre le drainage est soit rapide, soit bon en ce qui concerne TM, et soit bon, soit mauvais en ce qui concerne TE.

Si on examine l'importance relative des différents types de dépôts, tel que présentés au tableau 4.4, on observe que les affleurements rocheux (ROC) et les dépôts organiques (ORG), lorsqu'ils sont présents, occupent une très faible superficie relative ($< 10\%$). Les dépôts TM/R, TM, TE et S+G sont comparables en termes de superficie. Même si on regroupe ROC avec R+TM, les superficies de ce type de dépôt sont généralement plus faibles que pour les trois autres.

Si on examine la répartition géographique des dépôts (figure 4.4), on constate que les dépôts ROC+(R+TM) et TM/R se retrouvent principalement dans quatre zones. Les deux premières zones, situées au nord-est

Tableau 4.4: Fréquence de la distribution des différents types de dépôts selon la superficie relative occupée sur le bassin

superficie relative (%)	catégorie de dépôts							
	ROC	R+TM	ROC+ R+TM	TM/R	TM	TE	ORG	S+G
< 0,1	127	47	43	13	4	11	50	150
0,1 - 10	25	53	52	25	27	36	107	2
10 - 20	6	29	31	34	31	27	1	2
20 - 30		15	17	51	37	32		2
30 - 40		7	6	25	29	17		1
40 - 50		7	7	6	19	13		1
50 - 60			1	1	8	6		
60 - 70			1	3	2	7		
70 - 80					1	6		
80 - 90						2		
90 - 100						1		

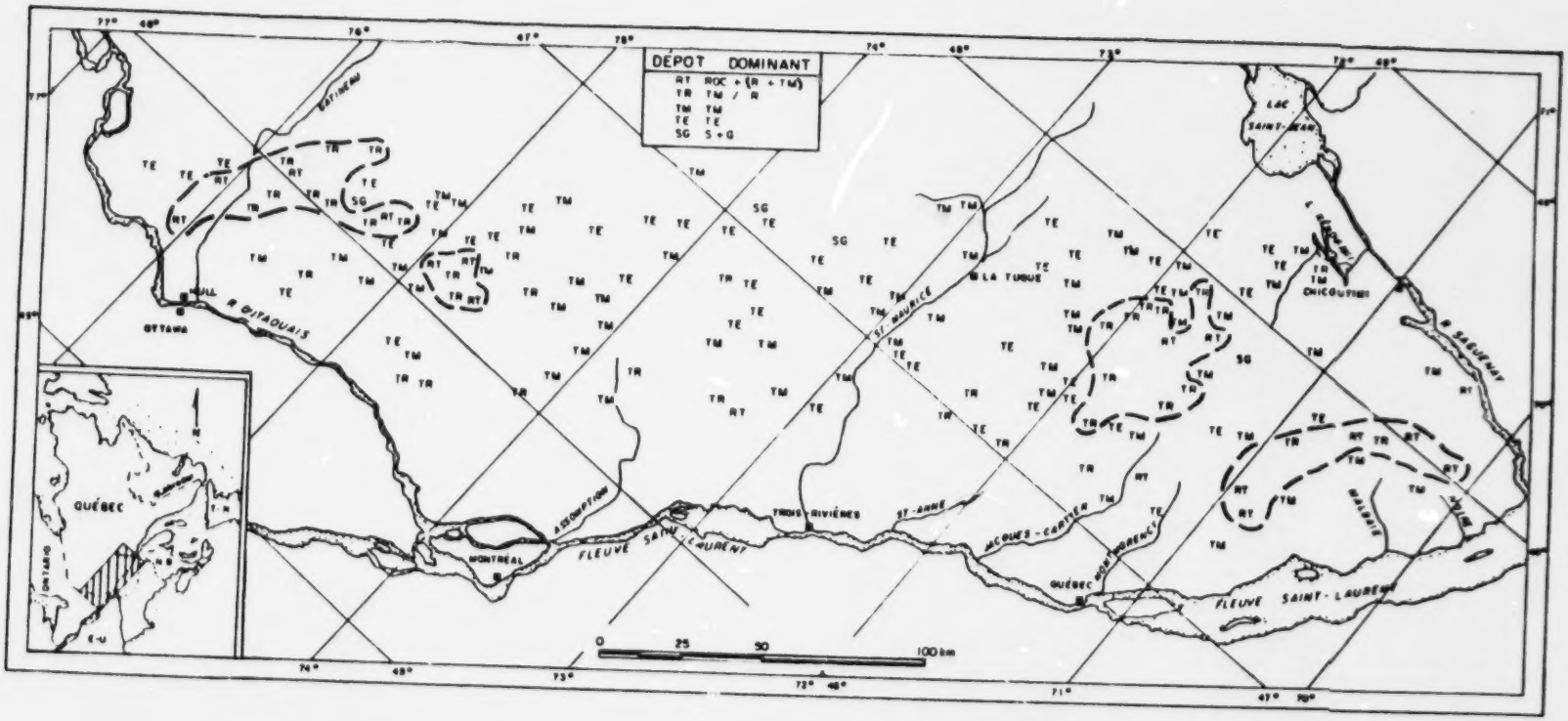


FIGURE 4.4: Classification des bassins versants selon le dépôt dominant (occupant le plus grand pourcentage de superficie dans chaque bassin versant).

de la région étudiée, correspondent à une région où l'altitude est élevée (cf. figure 4.2). Par contre, les deux autres zones qu'on retrouve au sud-ouest de la région étudiée, correspondent à des régions où l'altitude est la plus basse (< 300 m). Cette observation montre donc que pour la région étudiée, l'épaisseur des dépôts meubles n'est pas nécessairement en relation avec l'altitude mais plutôt avec la morphologie locale du relief.

4.2 Variables de la végétation

Cet ensemble de variables regroupe les mesures, sur le bassin versant, des superficies occupées par différents types de végétation. Les types de végétation qui ont été répertoriés peuvent être classés en deux catégories selon qu'on a distingué ou non une densité de végétation. Dans la première catégorie, on retrouve les variables suivantes:

- arboré résineux (AR)
- arboré feuillu (AF)
- mélangé (ME)
- arboré résineux; coupe partielle
- arboré feuillu; coupe partielle

Le terme "mélangé" s'applique à la présence simultanée de résineux et de feuillus dans des proportions variant entre 25 et 75%. Pour chacune de ces cinq variables, on a distingué cinq classes de densité de couvert arboré:

1- inférieur à 25%
2- entre 25 et 40%
3- entre 40 et 60%
4- entre 60 et 80%
5- supérieur à 80%

Les autres variables sont les suivantes:

- coupe totale; sans regénération
- coupe totale; AR en regénération
- coupe totale; AF en regénération
- coupe totale; ME en regénération
- dénudé sec
- dénudé humide
- arbustif haut
- arbustif bas

Le nombre d'unités de superficies sur lesquelles sont présents ces différents types de végétation, tel que présenté au tableau 4.5, montre l'importance relative des variables considérées. On voit donc que la majorité des variables sont présentes sur un faible nombre de bassins versants. Les seuls types de végétation présents de façon importante sont les résineux et les feuillus de densité 3 et 4 et les arbustifs bas.

Devant le faible nombre d'unités de superficies sur lesquelles on retrouve les différents types de végétation, on a procédé à un regroupement de certaines variables. En ce qui concerne l'arboré résineux et l'arboré feuillu, on ne conserve que deux classes de densité (faible ou élevée), en regroupant ensemble les classes 2 et 3 ainsi que les classes 4 et 5. Les différentes catégories de coupe partielle et totale ont été regroupées en une seule variable. En outre, on a regroupé également ensemble les arbustifs hauts, les arbustifs bas et les surfaces dénudées humides qui sont des variables de végétation de milieu humide (VMH). Le nombre, la moyenne et l'écart-type de ces nouvelles variables, fournis au tableau 4.6, ainsi que leur distribution de fréquence selon la superficie relative occupée sur le bassin, présentée au tableau 4.7, permettent de caractériser ces types de végétation et d'évaluer leur importance relative.

Le nombre de bassins versants sur lesquels on retrouve les nouveaux regroupements de types de végétation est relativement élevé (plus de 60% des bassins versants) à l'exception de la coupe où ce nombre (83) est plus

Tableau 4.5: Répartition des unités de superficies de bassin > 0,1% selon le type et la densité de végétation

type de végétation	densité de végétation					ensemble
	1	2	3	4	5	
arboré résineux (AR)	0	21	114	104	22	144
arboré feuillu (AF)	2	36	108	119	45	140
mélange (ME)	0	0	2	2	1	4
AR; coupe partielle	0	1	5	0	0	6
AF; coupe partielle	0	15	18	3	0	25
coupe totale sans regénération	-	-	-	-	-	38
coupe totale; AR en regénération	-	-	-	-	-	25
coupe totale; AF en regénération	-	-	-	-	-	9
coupe totale; ME en regénération	-	-	-	-	-	30
dénudé sec	-	-	-	-	-	13
dénudé humide	-	-	-	-	-	6
arbustif haut	-	-	-	-	-	46
arbustif bas	-	-	-	-	-	96

Tableau 4.6: Nombre, moyenne et écart-type des superficies de bassin > 0,1% selon le type de végétation

type de végétation	nombre de bassins versants	moyenne	écart-type
arboré résineux (F)	114	14,7	14,1
arboré résineux (E)	109	17,6	17,3
arboré feuillu (F)	112	17,1	16,3
arboré feuillu (E)	119	41,1	25,6
coupe partielle + totale	83	32,3	25,3
dénudé humide + arbustifs	111	2,4	2,8

(F) densité du couvert arboré entre 25 et 60%
(E) densité du couvert arboré supérieure à 60%

Tableau 4.7: Fréquence de la distribution du nombre de basssins versants selon la catégorie de végétation et la superficie relative

superficie relative (%)	catégorie de végétation[1]					
	AR(F)	AR(E)	AF(F)	AF(E)	CPT	VMH
< 0,1	44	49	46	39	75	47
0,1 - 10	60	51	50	20	22	109
10 - 20	25	19	27	13	14	1
20 - 30	11	16	15	12	11	1
30 - 40	9	11	10	11	4	0
40 - 50	6	5	3	14	12	0
50 - 60	2	4	4	13	7	0
60 - 70	1	2	2	18	3	0
70 - 80	0	0	1	12	7	0
80 - 90	0	1	0	6	2	0
90 - 100	0	0	0	0	1	0

[1] (F): densité du couvert arboré entre 25 et 60$
(E): densité du couvert arboré supérieure à 60%
CPT: coupe partielle + coupe totale
VMH: arbustifs hauts + arbustifs bas + dénudé humide

faible (tableau 4.6). Par contre, lorsqu'il y a coupe, la superficie atteinte est généralement élevée (en moyenne 32% de la superficie du bassin versant).

Si on compare les superficies moyennes occupées par chacun des regroupements de types de végétation (tableau 4.6), on constate que c'est la végétation de milieu humide qui a la plus faible superficie moyenne (2,4%) alors que l'arboré feuillu de densité élevée a la superficie moyenne la plus élevée (41,1%). Sur un nombre important (49) de bassins versants, la superficie relative occupée par l'arboré feuillu dense dépasse 50% (tableau 4.7). Par contre, sur la presque totalité des bassins versants, la superficie relative occupée par la végétation de milieu humide est inférieure à 10%.

Si l'on exclut les superficies de coupe (CPT) et de végétation de milieu humide (VMH) l'arboré feuillu de densité élevée est le type de végétation que l'on retrouve dominant sur la majeure partie des bassins versants de la région étudiée (figure 4.5). On retrouve en dominance l'arboré résineux de densité élevée dans la partie nord-est où l'altitude est élevée et la précipitation abondante.

4.3 Variables géologiques

Les roches présentes sur les bassins versants de la région étudiée ont été identifiées à partir de rapports géologiques et de cartes géologiques à différentes échelles (Gouvernement du Québec, 1969; Avramtchev et Marcoux, 1980); on a déterminé également leur superficie relative occupée sur le bassin versant (annexe A).

Les différents types de roches identifiés ont par la suite été réunis en dix groupes selon leur altérabilité, leur sensibilité à la charge acide et leur pouvoir tampon. Ces groupes comprennent principalement les roches suivantes:

1- marbre et roche calcosilicatée
2- anorthosite, gabbro, anorthosite gabbroïque, métagabbro
3- diorite, diorite à pyroxène, diorite gneissique

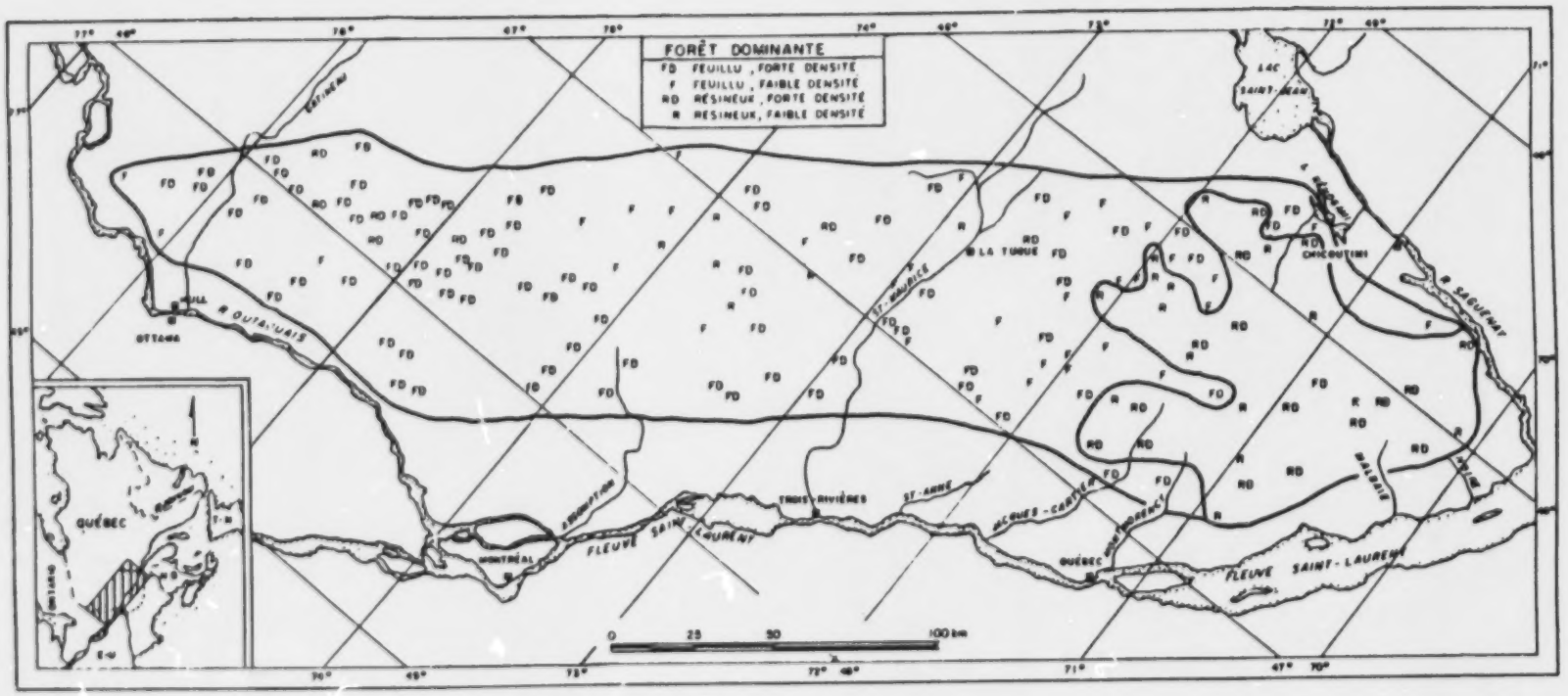


FIGURE 4.5: Classification des bassins versants selon le type de végétation dominant (représenté, dans chaque bassin versant, par le plus fort pourcentage de superficie occupé par un même type de végétation.

4- migmatites, migmatites à biotite, migmatites à trame de gneiss, paragneiss et granites associées, migmatites à plagioclase, migmatites à hornblende
5- paragneiss, paragneiss de Grenville, paragneiss et roches ignées associées, paragneiss mixtes à amphibole, paragneiss mixtes
6- gneiss, gneiss intermédiaires, complexe gneissique, gneiss graphitiques, gneiss avec injection
7- gneiss à biotite, gneiss à pyroxène, gneiss à amphibole, gneiss à quartz, gneiss à hornblende, gneiss à sillimanite et grenat
8- mangérite, monzonite, migmatites charnockitiques, gneiss charnockitiques, syénite, granulites charnockitiques, monzonite à pyroxène
9- granite avec pegmatite, gneiss granitiques, granodiorite, granite à biotite
10- quartzite, paragneiss quartzofeldspathique

Pour chacun des bassins versants où on retrouve plus d'un type de roches appartenant à des groupes différents, une évaluation du groupe prédominant a été faite (figure 4.6). Cette estimation tient compte en partie de l'importance de la superficie occupée par les roches (cf. annexe A) et principalement du niveau d'altérabilité des roches. On considère que plus le numéro du groupe augmente, plus le niveau d'altérabilité est faible. La répartition des bassins selon la roche prédominante est la suivante:

Groupe de roche	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
nombre de bassins versants	9	8	7	18	17	11	12	62	11	3

Le groupe 8, qui est constitué principalement de la mangérite et de la monzonite, est celui que l'on retrouve majoritairement sur la région étudiée (figure 4.6). Ce groupe délimite deux zones principales parmi lesquelles l'une, la plus vaste, englobe toute la partie nord-est de la région étudiée et l'autre recouvre un petit territoire situé près de La Tuque, de chaque côté de la rivière Saint-Maurice.

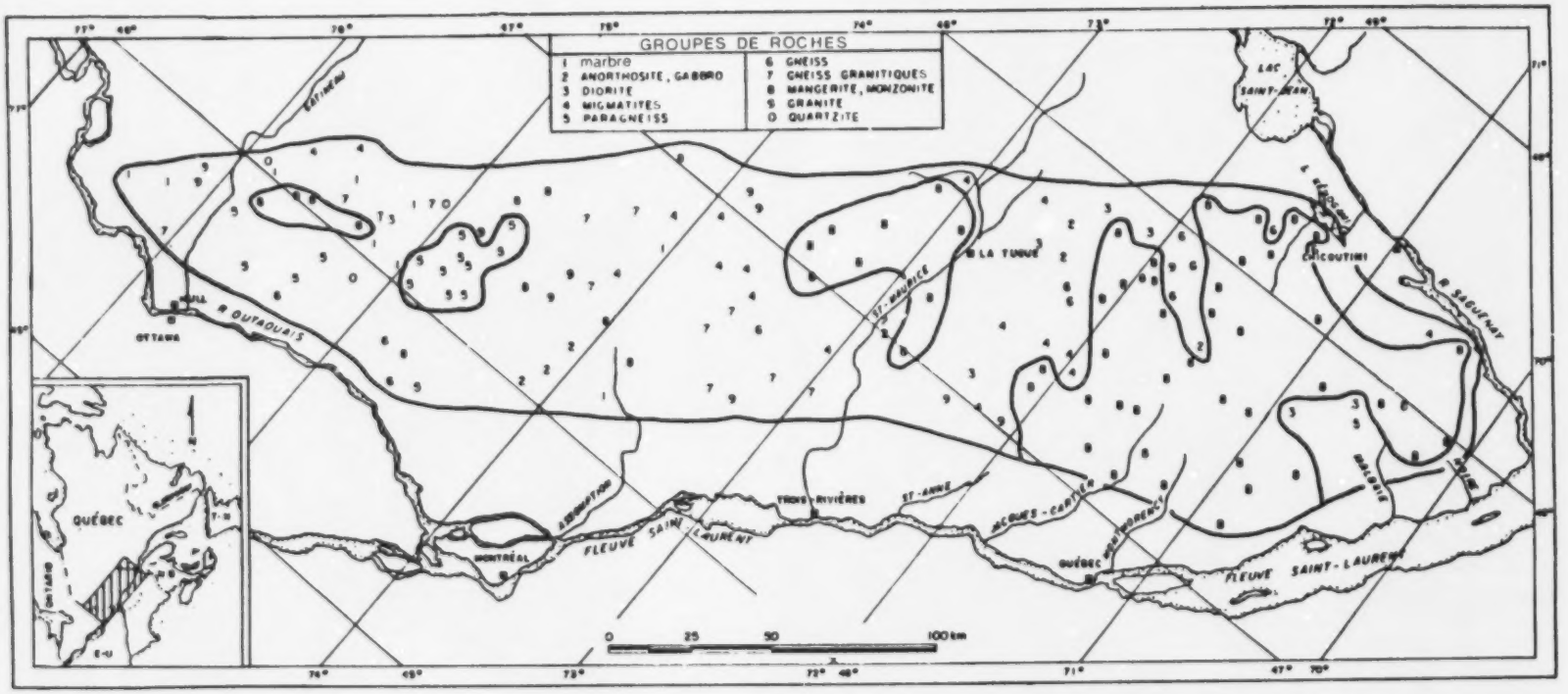


FIGURE 4.6: Classification des bassins versants selon dix groupes de roches.

4.4 Conclusion

- L'altitude et la précipitation sont des variables qui délimitent des zones bien définies sur la région étudiée. Dans certains secteurs ces zones se superposent et indiquent que ces variables sont reliées entre elles (figures 4.2 et 4.3).

- Les dépôts meubles divisés en quatre classes d'épaisseur ($< 0{,}1$, 0,1-0,5, 0,5-1,0, $> 1{,}0$ m) se distribuent à l'intérieur de la région étudiée selon la morphologie du relief structural.

- Nos données confirment que les surfaces dénudées ou recouvertes d'une mince couche de till ($< 0{,}1$ m) sont généralement associées à une pente forte ($> 30\%$) et ont un très bon drainage, tandis que les surfaces recouvertes d'une couche de till appréciable ($> 0{,}5$ m) sont plutôt des terrains mal drainés à pente faible.

- Les surfaces recouvertes d'une mince couche de till (R + TM et TM/R) se retrouvent principalement dans des zones où l'altitude est élevée. Toutefois dans la vallée de l'Outaouais, où l'altitude est plutôt basse (< 300 m), ce type de dépôt est dominant sur un grand nombre de bassins versants.

- Sur la majeure partie des bassins versants de la région étudiée, le type de végétation dominant est l'arboré feuillu dont la densité du couvert est supérieure à 60%. Par contre l'arboré résineux domine dans la partie nord-est où l'altitude est élevée et la précipitation abondante.

- Les roches que l'on retrouve sont principalement des roches charnockitiques (mangérite, monzonite, migmatites). Ces roches sont présentes surtout dans la partie nord-est de la région étudiée.

5. ANALYSE DES RELATIONS ENTRE LES VARIABLES PHYSICO-CHIMIQUES DE L'EAU DES LACS ET LES VARIABLES BIOPHYSIQUES DU MILIEU

Dans ce chapitre, on vise par l'emploi de méthodes statistiques classiques (corrélation de Pearson, corrélation de Spearman, analyse en composantes principales) à identifier et à interpréter les relations entre chacune des variables physico-chimiques mesurées dans l'eau (pH, conductivité, concentration en ions majeurs, concentration en métaux, couleur) et chacune des variables physiographiques (altitude, superficie du lac ou du bassin versant, rapport superficie bassin versant/superficie lac), variables concernant la nature et l'épaisseur des dépôts meubles (type de dépôt, pente et drainage) et les variables de la végétation (arboré résineux ou feuillu, coupe, arbustes).

5.1 Démarche utilisée

Afin de procéder à l'identification des relations possibles entre variables physico-chimiques et variables biophysiques, on calcule pour chaque paire de variables, le coefficient de corrélation de Pearson et celui de Spearman et on examine leur niveau de signification. On trouvera à l'annexe B une brève description des formules utilisées pour le calcul de ces coefficients et de leur test de signification. Rappelons que lorsque la distribution des valeurs des paramètres ne suit pas une loi normale, le coefficient de corrélation non-paramétrique de Spearman donne généralement de meilleurs résultats que le coefficient paramétrique de Pearson, car le coefficient de Spearman est calculé à partir des rangs de classement. Le calcul simultané de ces deux types de corrélation facilite la recherche des relations possibles entre paires de paramètres, sans avoir à vérifier continuellement la normalité des distributions.

Afin d'effectuer une synthèse des interrelations entre variables, on utilise la méthode d'analyse en composantes principales appliquée sur la matrice des coefficients de corrélation de Spearman. Cette méthode permet de résumer dans un espace de dimension réduite la plus grande partie de la variabilité d'une matrice de dispersion d'un grand nombre de descripteurs et

de connaître aussi la quantité de variance expliquée par les premiers axes principaux (Legendre et Legendre, 1979).

Afin de rendre plus objectif et plus systématique l'examen des proximités entre les points variables dans l'espace factoriel, on a été amené à utiliser la méthode de classification ascendante hiérarchique (CAH) mise au point par Jambu (1978). Cette méthode permet, en effet, de regrouper de manière automatique et selon des critères d'agrégation choisis, les points en classes et d'ordonner les groupes de points de façon à visualiser la hiérarchie du classement.

En ce qui concerne la physico-chimie, 16 variables sont retenues, soit: H^+ (ou pH), Ca, Mg, Na, K, alcalinité, SO_4, Cl, NO_3, Al, Mn, Fe, couleur, conductivité, somme des cations, somme des anions. Les variables biophysiques du milieu sont les 19 variables suivantes: l'altitude, la superficie du bassin versant, la superficie du lac, la superficie de tourbière, la précipitation, le rapport superficie du bassin versant/superficie du lac, la position des lacs selon l'axe S.O.-N.E. et selon l'axe N.O.-S.E., la superficie des dépôts ROC+(R+TM), TM/R, TM, TE et ORG, les superficies d'arboré résineux à densité faible ou élevée, d'arboré feuillu à densité faible ou élevée, de coupe (partielle + totale) et de végétation de milieu humide (VMH).

Pour vérifier si, en ce qui concerne les dépôts, la pente ou le drainage sont des variables importantes à considérer, une seconde analyse de corrélations a été faite entre un groupe de variables physico-chimiques comprenant la somme des cations, le pH, les ions H^+, l'alcalinité, les sulfates, l'aluminium, le manganèse, le fer, la couleur et le groupe des variables dépôts pour différentes classes de pente ou de drainage.

5.2 Identification des relations

Des coefficients de corrélation de Pearson et de Spearman ont été calculés entre des variables physico-chimiques et des variables dépôts pour différentes classes de pente ou de drainage. L'examen des coefficients de corrélation significativement différents de zéro, présentés au tableau 5.1, montre que peu de relations sont observées entre les variables physico-

Tableau 5.1: Coefficients de corrélation significativement différents de zéro (au niveau de 5%) entre les différents types de dépôts et les variables physico-chimiques.

variable dépôt[1]	nombre	$\sum$cations	pH	H$^+$	Alcal	SO_4	Al	Mn	Fe	Coul.
ROC (F-R)	31	2						0,35		
B+TN (F-R)	111			0,19			0,18			-0,26
							0,16			-0,26
TN/R (D-R)	21									
TN/R (I-R)	51									
TN/R (I-R)	25									
			0,36	-0,38	0,35					
TN/R (F-R)	140								-0,22	-0,22
		0,15							-0,19	-0,18
TN (D-M)	35									
TN (D-R)	74									
TN (I-R)	117									-0,19
										-0,20
TN (I-R)	112	-0,16								
TN (F-R)	45									
TE (D-M)	138		-0,19							0,44
									0,18	0,39
TE (D-R)	104									0,33
										0,27
TE (I-R)	14	-0,56								
TE (I-R)	58									

1 Pour l'identification des dépôts, cf. tableau 4.2.
Les lettres entre parenthèses désignent la pente et le drainage (cf. tableau 4.3).

2 [-] corrélation de Pearson
[-] corrélation de Spearman

chimiques et les variables concernant les dépôts. Les relations les plus évidentes sont celles impliquant la couleur et certains types de dépôts. La couleur est reliée négativement avec R + TM (F-R), TM/R (F-R) et TM (I-R), et positivement avec TE (D-M) et TE (D-B). Cette relation indique que la variation de la couleur est dépendante de la présence plus ou moins importante de till épais, les facteurs de drainage et de pente ayant une influence moindre. Ouant aux relations observées entre les autres variables physico-chimiques et les variables concernant les dépôts, elles sont généralement observées pour un seul type de corrélation (Pearson ou Spearman) et plutôt faibles. L'absence de relation apparente entre ces deux groupes de variables montre que le fait de distinguer différentes classes de pente ou de drainage n'améliore pas la relation. On doit donc en conclure que dans l'analyse des corrélations entre variables, il est préférable de regrouper les données par type de dépôts sans faire de distinction pour la pente ou le drainage.

L'analyse des corrélations entre les 19 variables biophysiques du milieu et les 16 variables physico-chimiques définies ci-dessus (cf. section 5.1) permet d'identifier des relations entre des caractéristiques du milieu et la qualité de l'eau. L'examen des corrélations de Pearson et de Spearman entre ces deux groupes de variables, présentées au tableau 5.2, révèle que, parmi l'ensemble des variables biophysiques considérées, l'altitude, la précipitation et la position selon l'axe S.O.-N.E. sont les variables qui sont reliées les plus fortement au plus grand nombre de variables physico-chimiques. Ces variables sont reliées négativement à Ca, Mg, K, alcalinité, SO_4 , Cl et par le fait à la somme des cations, la somme des anions et la conductivité; elles sont reliées positivement à H^+, NO_3, Al et Fe.

Rappelons que l'observation d'une corrélation entre deux variables ne signifie pas nécessairement une relation de cause à effet entre ces deux variables. L'altitude et la précipitation peuvent expliquer des variations de la minéralisation de l'eau des lacs. Par contre, la relation observée entre la minéralisation et la position selon l'axe S.O.-N.E. peut être expliquée par d'autres causes telles que la variation de la géologie, du relief et de la précipitation.

Tableau 5.2: Coefficients de corrélation significativement différents de zéro (au niveau de 5) entre les variables physico-chimiques et les variables biophysiques.

Variables biophysiques	Variables physico-chimiques															
	∑cat.	∑anions	Cond.	H^+	Ca	Mg	Na	K	Alcal.	SO_4	Cl	NO_3	Al	Mn	Fe	Coul.
altitude	-0,46 -0,62	-0,45 [1] -0,60	-0,34 -0,38	0,26 0,53	-0,45 -0,62	-0,44 -0,62		-0,37 -0,36	-0,46 -0,62	-0,52 -0,57	-0,25 -0,25	0,22 0,26	0,38 0,48		0,18 0,26	
superficie B.V.				0,17	-0,13		0,16					0,20 0,30	0,33 0,18		0,23 0,19	0,16 0,17
superficie lac											-0,24 -0,24		-0,18	-0,13 -0,16		-0,15 -0,19
superficie tourb.			-0,15	0,18									0,14 0,19	0,16 0,17	0,21 0,28	0,20 0,26
précipitation	-0,30 -0,40	-0,29 -0,38	-0,20 -0,14	0,28 0,33	-0,21 -0,42	-0,33 -0,45		-0,14	-0,28 -0,32	-0,21 -0,21	-0,26 -0,23	0,32 0,28	0,41 0,35		0,21 0,26	
s. B.V./s. lac				0,29 0,14			0,21	-0,14				0,21 0,24	0,24 0,41	0,51 0,44	0,34 0,23	0,30 0,32	0,38 0,44
S-O,N-E.	-0,50 -0,46	-0,50 -0,48	-0,27 -0,15	0,19 0,39	-0,48 -0,48	-0,53 -0,57	0,18 0,18	-0,21 -0,23	-0,40 -0,33	-0,76 -0,80	-0,41 -0,43	0,21 0,28	0,32 0,44	-0,18	0,14 0,18	0,16
N.-O., S-E.	0,28 0,35	0,27 0,33	0,30 0,35	-0,21 -0,27	0,25 0,33	0,29 0,32	0,21 0,21	0,33 0,41	0,31 0,38			-0,18	-0,31 -0,26			0,21
BDC et (B+TN)													0,13	-0,16		-0,33 -0,35
TN/B	0,27	0,22	0,14 0,28	-0,22	-0,22	0,14 0,17	0,16		0,17	0,15 0,15			0,29 0,13		-0,21 -0,19	-0,19 -0,18
TN								-0,18 -0,16								
TE														0,15 0,21	0,20 0,26	0,40 0,45
ORG			-0,16 -0,18	0,18							0,18 0,14			0,15 0,15	0,15 0,25	0,35 0,36
AR(F)	-0,25 -0,27	-0,26 -0,29	-0,16	-0,16 0,34	-0,24 -0,28	-0,26 -0,30		-0,15	-0,23 -0,26	-0,23 -0,28			0,26 0,27		0,22	0,16 0,19
AR(E)			0,15							-0,18		0,18	0,16	-0,14 -0,20		-0,21 -0,16
AR(F)	-0,18	-0,18 -0,13		0,16	-0,18	-0,23 -0,19			-0,15	-0,19 -0,18	-0,30 0,33					
AF(E)	-0,40 -0,45	-0,40 -0,45	-0,26 -0,23	0,26 0,49	-0,38	-0,44 -0,48			-0,35 0,38	-0,44 0,43	-0,32 0,29	0,22 -0,13	0,33 0,44		0,18 0,28	
CP + CT	-0,21 0,29	-0,20 -0,27	-0,15	0,34	-0,22	-0,20 -0,27	0,18		-0,20 0,25	-0,13 -0,26		0,18 0,21	-0,29 0,39	0,20	0,30 0,32	0,26 0,29
VMH											0,14			0,18	0,15 0,23	0,26 0,34

[1] . corrélation de Pearson
. corrélation de Spearman

Les autres variables physiographiques telles que la superficie du bassin versant, la superficie du lac, la superficie de tourbières, le rapport superficie du bassin versant/superficie du lac ne sont pas reliées aux variables de minéralisation, mais plutôt avec des variables telles que la couleur, le fer, l'aluminium et le manganèse.

Les variables physiques décrivant le type de dépôt ne semblent pas reliées aux variables de minéralisation, à l'exception du till mince sur roc (TM/R) où on observe des coefficients de corrélation de Spearman significativement différents de zéro. En fait, à l'exception de TM, ces variables sont plutôt reliées avec la couleur, le fer et jusqu'à un certain point le manganèse. La couleur et le fer augmentent lorsque la superficie de till épais (TE) ou de dépôts organiques (ORG) augmente et diminuent lorsque la superficie de roc et till mince (ROC+(R+TM) et TM/R) augmente. Il semble donc que la couleur et le fer seraient les seules variables physico-chimiques parmi celles considérées, qui seraient reliées à l'abondance des minéraux et au temps de séjour des eaux dans le bassin.

L'absence de relations observées entre la minéralisation et le type de dépôts peut sembler difficilement explicable à première vue. On s'attendrait à ce que la minéralisation augmente dans les régions recouvertes d'une épaisse couche de till (associées à une pente douce et à un drainage mauvais) à cause de l'abondance des minéraux et du temps de contact plus long favorisant l'échange avec les minéraux. On s'attendrait également à ce que le phénomène inverse se produise dans les bassins comprenant de grandes superficies d'affleurements rocheux dénudés ou celles recouvertes d'une mince couche de till (associée à une pente forte et à un bon drainage). Une explication possible serait que les effets causés par les variations dans les dépôts sont masqués par d'autres effets de plus grande importance provenant soit de la géologie, soit de facteurs physiographiques. Les bassins où on retrouve des surfaces d'affleurements rocheux ou celles recouvertes d'une mince couche de dépôts se répartissent essentiellement sur deux grandes zones (l'une située au nord-est, l'autre située au sud-ouest de la région étudiée) dont l'altitude, la précipitation et la géologie sont très différentes (figures 4.2, 4.3 et 4.4). Cette hétérogénéité dans la répartition des dépôts peut être responsable de l'absence de relations entre la minéralisation et le type de dépôts.

Parmi le groupe de variables décrivant le type de végétation, l'arboré feuillu de densité élevée (AF(E)), l'arboré résineux de faible densité (AR-(F)) et la coupe (CP+CT) sont les trois variables les plus reliées aux variables de minéralisation. Ces variables de minéralisation sont corrélées positivement avec AF(E) et négativement avec AR(F) et CP+CT.

En ce qui concerne la variable H^+, on constate que celle-ci diminue (le pH augmente) avec l'augmentation de la superficie d'arboré feuillu dense (AF(E)) et augmente (le pH diminue) lorsqu'il y a augmentation de la superficie d'arboré résineux à faible densité (AR(F)) et de coupe (CP+CT). Ces relations montrent donc un certain lien entre le pH et le type de végétation, les feuillus denses étant associés aux eaux de pH élevé et les conifères à faible densité (densité entre 25 et 60%) étant associé aux eaux de pH faible.

5.3 Analyse globale des interrelations

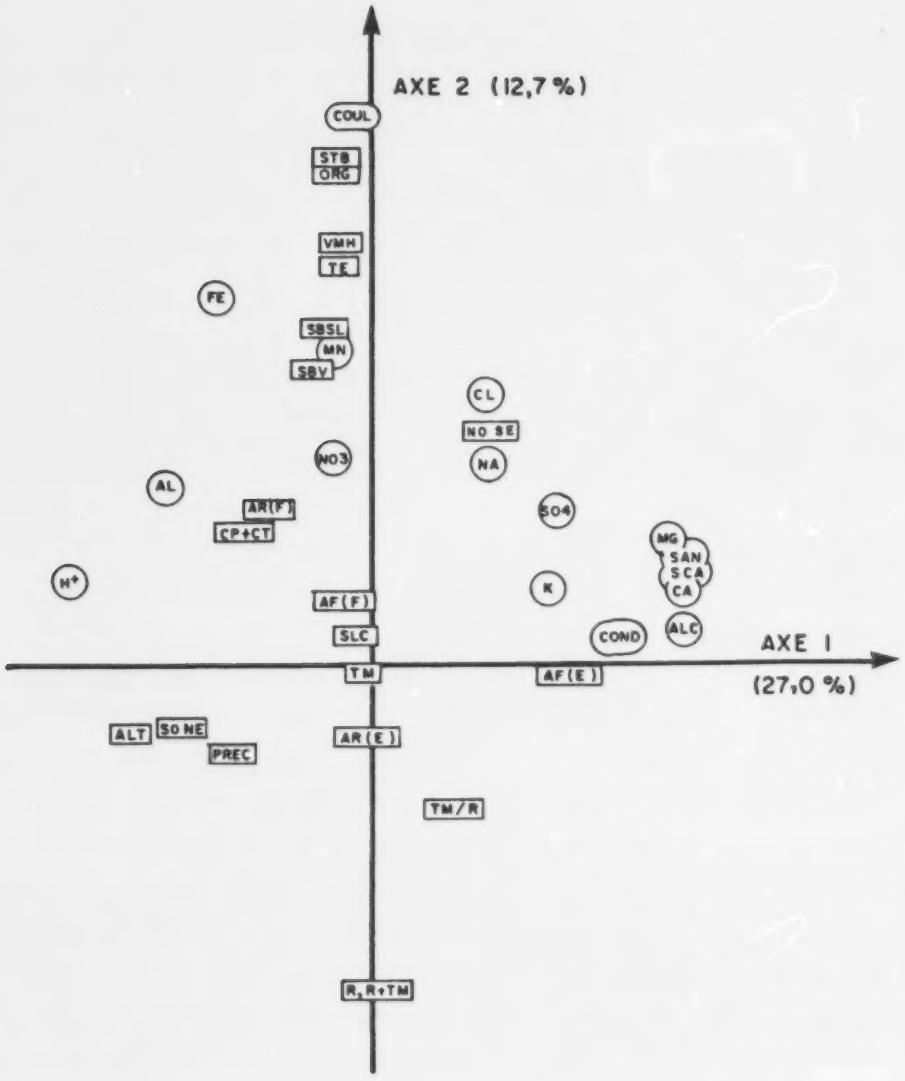
La matrice des coefficients de corrélation de Spearman, calculée à partir des données obtenues pour les 35 variables considérées (19 variables biophysiques + 16 variables physico-chimiques), est la matrice de dispersion sur laquelle on applique la méthode d'analyse en composantes principales (ACP). Par cette méthode, la variabilité totale des données exprimée par la matrice de corrélation est redistribuée en ordre décroissant sur un nombre réduit de facteurs orthogonaux qui permettent de représenter les interrelations entre les variables d'une manière simple. Grâce à la transformation obtenue, les variables sont représentées par des points dans un nouveau système d'axes orthogonaux dans lesquels la distance entre les points est interprétée en termes d'intensité de relation. Une proximité entre deux points indique une corrélation positive entre les variables alors qu'un éloignement peut être interprété comme une corrélation négative ou une absence de relation.

La variabilité expliquée sur les premiers axes principaux est la suivante:

axes	1	2	3	4	5	6	7	8
variabilité expliquée (%)	27,0	12,7	8,9	7,8	6,2	4,6	3,7	3,7
variabilité expliquée cumulée (%)	27,0	39,7	48,6	56,4	62,6	67,2	70,9	74,6

La représentation des points variables dans le plan des axes principaux 1 et 2 (figure 5.1) avec 39,7% de variabilité expliquée, permet d'exprimer les tendances générales. Sur l'axe 1, on observe une opposition entre, d'une part, le groupe des variables suivantes: Ca, Mg, K, SO_4, alcalinité, somme des cations, somme des anions, conductivité, arboré feuillu dense et, d'autre part, le groupe composé de H^+, altitude, précipitation, direction S.O.-N.E. L'axe 1 exprime donc la minéralisation des lacs et les facteurs du milieu reliés à cette minéralisation. Sur l'axe 2, on retrouve principalement, à une extrémité de l'axe, la couleur, les superficies de tourbières, de dépôts organiques, de végétation de milieu humide (VMH) et de till épais; à l'autre extrémité de l'axe, on observe les points représentant les superficies de roc et roc + till mince (ROC+(R+TM)) et de till mince sur roc (TM/R). La couleur de l'eau et les facteurs du milieu reliés à la présence de substances organiques sont donc expliqués par l'axe 2.

Afin d'examiner d'une manière systématique et objective les proximités entre les points variables, on a appliqué la méthode de classification ascendante hiérarchique aux coordonnées des points variables sur les huit premiers axes factoriels. On a ainsi obtenu une classification des points variables en huit groupes; la représentation de la hiérarchie du classement



(%) VARIABILITÉ EXPLIQUÉE PAR L'AXE

FIGURE 5.1: Représentation dans le plan des axes 1 et 2 des facteurs des variables obtenus de l'analyse en composantes principales (ACP) appliquée sur la matrice des coefficients de corrélation de Spearman.

est indiquée à la figure 5.2 et la composition des huit groupes de points variables est définie au tableau 5.3.

Le fait de considérer les projections des points sur les huit premiers axes factoriels donne un regroupement de points différent de celui qu'on obtiendrait en considérant leur projection dans le plan des deux premiers axes principaux. En considérant huit axes factoriels, on prend en compte une fraction plus élevée de la variance totale, soit 74,6%, ce qui permet de calculer des distances entre points qui se rapprochent beaucoup des distances réelles. Dans le choix du nombre d'axes factoriels à retenir, il faut cependant être conscient que la considération d'axes non significatifs peut alourdir l'interprétation en introduisant un certain bruit de fonds.

Le regroupement des points les plus proches facilite l'identification des variables reliées positivement entre elles. Ainsi, la composition du groupe A permet d'affirmer que les variables de minéralisation (Ca, Mg, K, Na, alcalinité, conductivité, somme des cations, somme des anions) et la position selon l'axe S.E.-N.O. sont des variables interreliées entre elles. La corrélation observée avec cette dernière indiquerait que plus on s'éloigne du fleuve plus la minéralisation des lacs augmente. Cependant, cette relation peut être biaisée par un mélange hétérogène, selon cet axe, des lacs faiblement minéralisés dans la partie nord-est avec les lacs fortement minéralisés dans la partie sud-ouest.

On observe que H^+ est regroupé avec Al, Mn, Fe, couleur, CP + CT et TE. La présence de H^+ dans ce groupe est difficile à expliquer si l'on examine la position du point H^+, par rapport aux autres points, dans le plan des deux premiers axes principaux (figure 5.1). Le regroupement effectué par la CAH tient compte des distances calculées à partir des projections sur un grand nombre d'axes factoriels (8). La projection des points sur un plan ne permet pas de visualiser les distances réelles. Le regroupement de H^+ du centre de gravité de ce nuage de point est plus faible que la distance le séparant du centre de gravité d'un autre nuage de points. Le regroupement de H^+ doit donc être interprété comme une similitude de variations avec un ensemble de variables, H^+ étant relié plus fortement avec Al et CP+CT qu'avec Mn, Fe, TE et couleur. Les relations observées avec la présence de coupes et de till épais sont difficiles à interpréter.

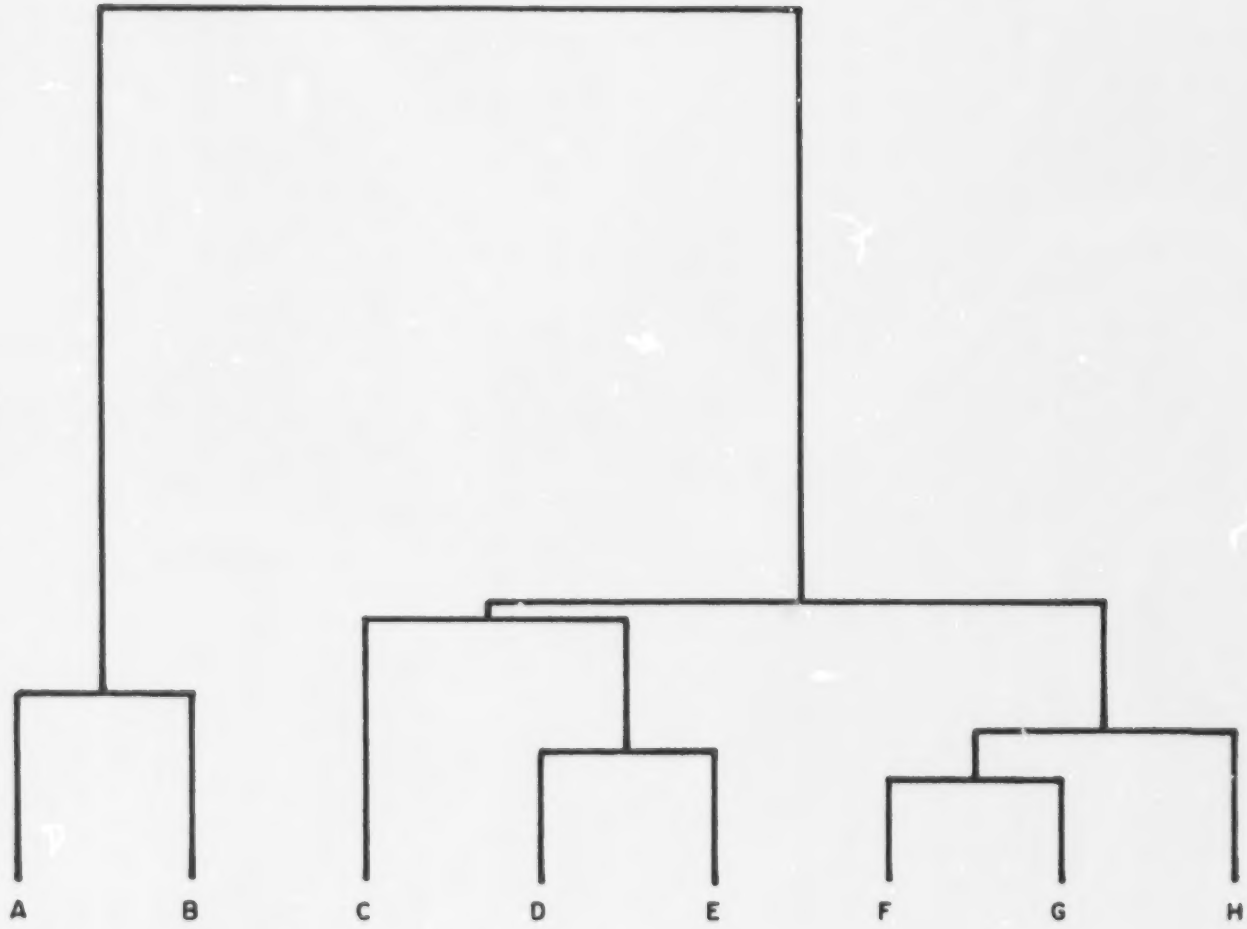


FIGURE 5.2: Classement hiérarchique des facteurs des variables obtenus de l'ACP appliquée sur la matrice des coefficients de corrélation de Spearman.

Tableau 5.3: Composition des huits groupes de points variables obtenus par l'application de la CAH sur les facteurs de l'ACP.

groupe	composition
A	cond., Σ cations, Σ anions, Ca, Mg, Na, K, alcal., N.-O.,S.-E.
B	SO_4, Cl, AF(E)
C	Al, Mn, Fe, coul., H , CP+CT, TE
D	Org., superficie tourb., VMH
E	superficie B.V., superficie lac
F	altitude, précipitation, AR(E), S.-O.,N.-E.
G	s. B.V./s. lac, TM, NO_3, AR(F), AF(F)
H	TM/R, ROC+ (R+TM)

En ce qui concerne la variable coupe, les données sont peu fiables, car elles proviennent de superficies plus ou moins déboisées au cours d'une période de temps relativement longue (>10 ans). La présence de TE dans ce groupe est beaucoup plus le résultat d'une corrélation de cette variable avec la couleur, le manganèse et le fer qu'avec l'ion H^+ (tableau 5.2).

L'examen de la composition de chacun des groupes permet de confirmer certaines corrélations notées précédemment entre les variables biophysiques et les variables physico-chimiques. Ainsi, on voit une étroite relation entre la superficie de tourbières, de dépôts organiques et de végétation de milieu humide. L'altitude, la précipitation, la superficie d'arboré résineux dense sont bien définies selon l'axe S.O.-N.E. La composition du groupe G montre que le rapport s.B.V./s.lac, l'arboré feuillu à faible densité, l'arboré résineux à faible densité, le till mince et les nitrates sont interreliées. On voit également que la présence de till mince sur roc (TM/R) est associée à la présence de roc et roc + till mince (ROC+(R+TM)).

Si on se place à un niveau supérieur dans la hiérarchie du classement et qu'on considère un nombre plus faible de groupes, quatre par exemple, on identifie d'autres interrelations entre variables d'un niveau plus faible. En réunissant les groupes F, G et H, on constate une certaine relation entre les dépôts de till mince (TM, TM/R, ROC+(R+TM)), l'arboré résineux (F ou E), l'arboré feuillu à faible densité, l'altitude, la précipitation, le rapport s.B.V./s.lac, la position selon l'axe S.O.-N.E. et les nitrates. Également, en réunissant les groupes D et E, on constate que les superficies de bassin versant et de lac sont plutôt reliées à la présence de dépôts organiques, de tourbières et de végétation de milieu humide. La composition des groupes A et B montre que l'arboré feuillu dense et la direction selon l'axe N.O.-S.E. (distance du fleuve) sont les variables physiographiques les plus reliées aux variables de minéralisation des eaux.

Il a été mentionné précédemment que dans ce type de représentation factorielle, une proximité entre deux points pouvait être interprétée comme une indication de la présence d'une relation positive entre ces deux variables. Par contre, une relation négative ou une absence de relation entre deux

variables se traduit par un éloignement entre les deux points représentant ces variables.

Pour identifier les groupes de variables interreliées négativement entre elles, on a d'abord procédé à un calcul des distances entre les centres de gravité des groupes et on a noté les groupes de points les plus distants les uns des autres. Les distances inter-groupes les plus grandes sont obtenues pour A-F, B-F, D-H et E-H. L'opposition sur l'axe 1 entre le groupe F et les groupes A et B (cf. figure 5.1) fournit une indication que les variables du groupe F (altitude, précipitation, direction N.O.-S.E., arboré résineux dense) sont reliées inversément aux variables de minéralisation (Ca, Mg, Na, K, alcalinité, cond., somme des cations, somme des anions). Cette indication est conforme aux observations notées lors de l'examen du tableau des coefficients de corrélation entre les variables (tableau 5.2). On peut également déduire que les variables du groupe H (TM/R, ROC+(R+TM)) sont reliées inversément aux variables des groupes D (ORG., s.tourb., VMH) et E (s.B.V., s.lac) en considérant leur opposition sur l'axe 2 (figure 5.1).

5.4 Conclusion

En résumé, l'analyse des interrelations entre variables faite par l'emploi combiné de l'analyse en composantes principales et de la classification ascendante hiérarchique a permis d'identifier les principales relations entre les variables biophysiques du milieu et les variables de qualité de l'eau.

- La superficie de till épais associée aux variables concernant la présence de substances organiques (tourbières, dépôts organiques, végétation de milieu humide),est reliée positivement à la couleur, au manganèse et au fer.

- Les variables décrivant les classes d'épaisseur de dépôts sont faiblement reliées à la minéralisation et au pH des lacs.

- Les variables du milieu les plus fortement reliées à la minéralisation et au pH des lacs sont l'altitude, la précipitation, la direction

S.O.-N.E., la superficie d'arboré résineux faible, la superficie d'arboré feuillu dense et les superficies de coupe. La minéralisation et le pH augmentent lorsque l'altitude, la précipitation et les superficies de coupe et de résineux de densité faible diminuent et que la superficie de feuillu dense augmente; cette augmentation de la minéralisation s'effectue suivant un gradient N.E.-S.O.

- Les concentrations de sulfates dans les lacs varient inversement avec l'altitude, la précipitation et la direction S.O.-N.E. et indirectement avec le taux de minéralisation. Les données ne permettent pas présentement de distinguer l'importance de l'influence des variables biophysiques (altitude, précipitation) et géologiques par rapport à l'éloignement des sources de sulfates (direction S.O.-N.E.).

- L'ensemble des données inventoriées n'a pas permis de faire ressortir, pour un type de dépôt donné, un éventuel effet de la pente et du drainage sur le taux de minéralisation de l'eau des lacs et sur la capacité de neutralisation des bassins versants.

6. RELATIONS ENTRE LES VARIABLES GÉOLOGIQUES ET LES VARIABLES PHYSICO-CHIMIQUES

L'analyse effectuée dans le chapitre précédent a permis d'identifier un certain nombre de relations entre les variables physico-chimiques mesurées dans l'eau des lacs et les variables biophysiques mesurées sur les bassins versants. Les méthodes statistiques utilisées (corrélations de Spearman, analyse en composantes principales) étaient appropriées au type de données disponibles. Cependant, les données géologiques recueillies dans cette étude n'ont pu être incluses dans l'analyse précédente à cause de leur nature qualitative. Dans ce chapitre, on utilise l'analyse discriminante pour examiner les relations possibles entre les variables géologiques du milieu et les variables physico-chimiques de l'eau des lacs.

6.1 Démarche utilisée

L'analyse discriminante est une technique statistique qui permet de séparer des groupes connus d'objets sur la base d'une série de descripteurs métriques dans le but de décrire et d'interpréter l'appartenance des membres à différents groupes (Legendre et Legendre, 1979). Les groupes dont il s'agit ici sont cinq groupes de types de roches établis à partir des dix groupes précédemment établis (cf. section 4.3). Ces groupes comprennent principalement les roches suivantes:

- groupe 1: marbre et roche calcosilicatée (groupe 1)
  groupe 2: anorthosite, gabbro (groupe 2) et diorite (groupe 3)
- groupe 3: migmatites (groupe 4), paragneiss (groupe 5), gneiss (groupe 6) et gneiss granitiques (groupe 7)
- groupe 4: mangérite et monzonite (groupe 8)
- groupe 5: granite (groupe 9) et quartzite (groupe 10)

La nouvelle répartition des bassins versants et la description de la localisation de ces groupes dans la région étudiée nous sont données dans ce qui suit:

groupe	1	2	3	4	5
nombre de bassins versants	9	15	58	62	14

Le groupe 3, qui regroupe les migmatites, les paragneiss et les gneiss, est devenu de taille comparable au groupe 4. Ces deux groupes se retrouvent sur 76% (120) des bassins versants. La répartition géographique des cinq groupes de roches, présentée à la figure 6.1, montre que les groupes 3 et 4 délimitent des zones bien définies. Le groupe 3 se retrouve principalement sur quatre zones: la première (A) est située à l'ouest de la rivière Rouge, à la hauteur de Sainte Jovite, la deuxième (B), moins bien définie, se retrouve à l'ouest et au nord-ouest du réservoir Matawin, la troisième (C) se situe sur un territoire s'étendant à l'est de la rivière Assomption jusqu'à la vallée du Saint-Maurice, la dernière (D) de plus faible superficie, est localisée à l'ouest de la réserve des Laurentides. Le groupe 4 est constitué principalement de deux zones parmi lesquelles l'une, la plus vaste, englobe toute la partie nord-est de la région étudiée, et l'autre recouvre un petit territoire situé à l'ouest de La Tuque.

Les descripteurs métriques à partir desquels on veut obtenir une discrimination des lacs sont des variables physico-chimiques qui sont susceptibles d'avoir le plus de relation avec la composition minéralogique des roches. Ces variables sont le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium, les ions H^+, les sulfates, l'aluminium, le manganèse et le fer.

La méthode consiste à trouver des combinaisons linéaires des descripteurs discriminants (fonctions discriminantes), qui maximisent la différence entre groupes tout en minimisant la variabilité à l'intérieur de chaque groupe (Legendre et Legendre, 1979). La solution au problème passe par la recherche des valeurs et des vecteurs propres de la matrice qui décrit le

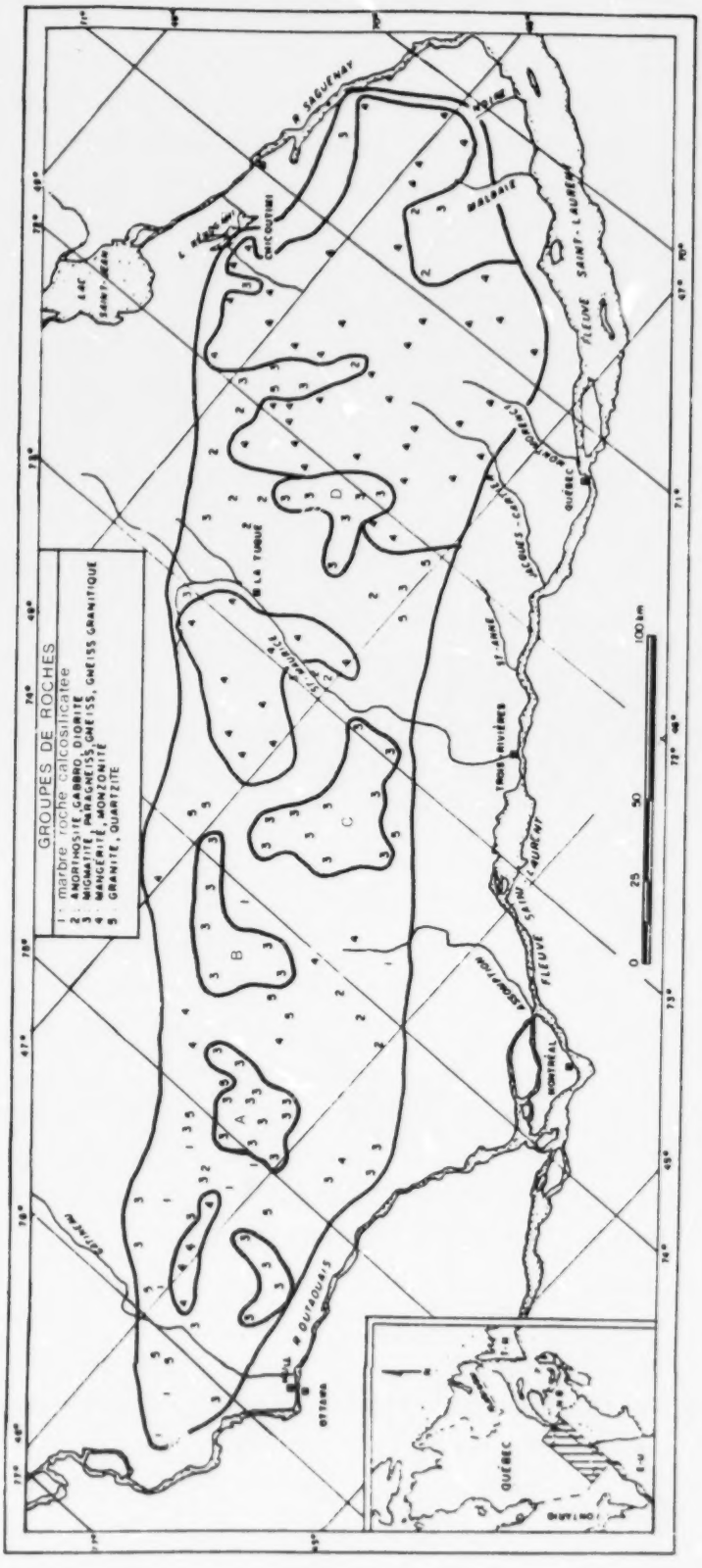


FIGURE 6.1: Classification des bassins versants selon cinq groupes de roches.

rapport de la dispersion intergroupe à la dispersion intragroupe. On obtient alors une représentation des objets dans laquelle le premier axe canonique indique la direction de plus grande variabilité entre les centroïdes des groupes, et ainsi de suite pour les axes canoniques successifs.

Un test utile en analyse discriminante est le lambda de Wilks qui permet d'établir si les groupes présentent des différences significatives quant à la position de leurs centroïdes. Plus une variable est discriminante pour l'analyse, plus la valeur de lambda est faible. On identifie donc avec un test de Fisher, appliqué aux valeurs de lambda, le niveau de signification d'un descripteur en tant que variable discriminante.

Les coefficients des fonctions discriminantes expriment les contributions relatives des variables aux fonctions discriminantes. Il est alors possible, de donner un sens physique aux axes canoniques à partir des valeurs élevées des coefficients. Toutefois, il est souvent préférable de se rapporter au niveau de corrélation entre la variable et la fonction discriminante pour interpréter les axes canoniques.

A partir des coordonnées des objets dans l'espace canonique, des coefficients de classification sont calculés pour chacun des groupes. Par la suite, ces coefficients sont convertis en probabilités d'appartenance à un groupe donné. Le programme de calcul utilisé est tiré de la banque de programmes SPSS (Nie et al., 1975). Dans ce programme, un objet est classé dans le groupe pour lequel celui-ci a la plus grande probabilité d'appartenance. On peut ainsi, pour chacun des objets, comparer l'appartenance prédite avec l'appartenance actuelle à un groupe. Cette comparaison permet de vérifier le taux de succès des variables discriminantes dans la classification des objets en un certain nombre de groupes.

6.2 Résultats de l'analyse discriminante

L'analyse discriminante a été appliquée sur le tableau des données obtenues sur l'ensemble des lacs de la région étudiée pour les neuf variables physico-chimiques énumérées à la section précédente. Les données relatives aux lacs 17, 26, 27 et 29, situés dans la vallée de l'Outaouais, ont été

éliminées de l'analyse; un examen préliminaire des données a montré que les valeurs extrêmement élevées de calcium et de magnésium pour ces lacs pouvaient biaiser les résultats de l'analyse. D'ailleurs, ces quatre lacs ont été jugés par Bobée et al. (1983) comme non représentatifs de la zone 5. Au tableau des données on note des valeurs manquantes de manganèse pour les lacs 98, 99 et 105 et des valeurs manquantes d'aluminium, de manganèse et de fer pour le lac 73. Puisque la méthode exige un tableau complet de données, on a jugé préférable de combler ces valeurs manquantes par la moyenne de la variable plutôt que d'exclure ces quatre lacs.

L'application de l'analyse discriminante avec cinq groupes géologiques a permis d'obtenir quatre fonctions discriminantes expliquant respectivement 60,3%, 29,2%, 8,4% et 2,1% de la variabilité totale. Seules les deux premières fonctions avec 89,5% de la variabilité totale ont été retenues pour l'interprétation, le test effectué au moyen du lambda de Wilks ayant montré que les deux autres fonctions ne sont pas significatives. Les coefficients de ces deux fonctions discriminantes sont présentés au tableau 6.1.

L'interprétation des deux fonctions discriminantes est faite en déterminant d'abord les variables les plus discriminantes. Le test de Fisher effectué à partir du calcul du lambda de Wilks (tableau 6.1) montre que les variables les plus discriminantes pour les groupes géologiques sont le calcium, le magnésium, le potassium, les sulfates, l'aluminium et à un degré moindre les ions hydrogène.

Les coefficients des fonctions discriminantes présentant les valeurs les plus élevées sont généralement associés aux variables identifiées à partir du rapport de Wilks comme les plus discriminantes. Toutefois, les variables non significatives (le sodium, fer et le manganèse) présentent parfois des coefficients élevés (spécialement sur la fonction 2). Puisque ces coefficients élevés sont parfois difficiles à interpréter, on se rapporte au niveau de corrélation entre les variables et les fonctions discriminantes (tableau 6.1). Les coefficients de corrélation calculés entre les variables

Tableau 6.1: Résultats de l'analyse discriminante: lambda de Wilks pour chacune des variables, corrélation entre la variable et la fonction discriminante et coefficients de la fonction discriminante.

variables	lambda de Wilks	corrélation entre la variable et la fonction discriminante		coefficients de la fonction discriminante	
		Fonction 1	Fonction 2	Fonction 1	Fonction 2
Ca	0,84 **	0,51	0,49	- 0,11	1,05
Mg	0,90 **	0,45	0,14	- 0,23	- 0,27
Na	0,97	0,07	- 0,29	- 0,05	- 0,71
K	0,84 **	0,57	0,32	0,71	0,23
H^+	0,92 *	- 0,27	0,00	0,48	- 0,44
SO_4	0,86 **	0,54	0,20	0,65	- 0,15
Al	0,85 **	- 0,52	0,26	- 1,07	0,94
Mn	0,99	- 0,00	- 0,04	0,24	- 0,44
Fe	0,97	- 0,20	0,02	0,08	0,29

Résultat du test de Fisher:

* niveau de discrimination significatif au niveau de confiance inférieur à 5%

** niveau de discrimination significatif au niveau de confiance inférieur à 1%

Tableau 6.2: Résultats de la classification obtenus de l'analyse discriminante

groupes géologiques	Nombre de lacs par groupe	Nombre de lacs classés dans le groupe prédit				
		1	2	3	4	5
1	6	4 (66.7)	0 (0)	1 (16.7)	1 (16.7)	0 (0)
2	15	0 (0)	8 (53.3)	4 (26.7)	3 (20.0)	0 (0)
3	57	3 (5.3)	10 (17.5)	27 (47.4)	5 (8.8)	12 (21.1)
4	62	0 (0)	15 (24.2)	4 (6.5)	39 (62.9)	4 (6.5)
5	14	1 (7.1)	3 (21.4)	1 (7.1)	2 (14.3)	7 (50.0)

( ) Pourcentage du nombre de lacs classés dans le groupe prédit

Pourcentage de l'ensemble des lacs bien classés: 55.19

et les fonctions permettent d'interpréter et de donner un sens physique aux fonctions discriminantes. Ainsi en ne retenant que les coefficients de corrélation supérieurs à 0,25, on trouve que la fonction 1 permet de séparer les bassins versants selon les valeurs croissantes de calcium, de magnésium, de potassium et de sulfates et les valeurs décroissantes d'aluminium et d'ions hydrogène. La fonction 2 permet une discrimination supplémentaire selon les valeurs croissantes de calcium, de potassium et d'aluminium.

Les 154 bassins versants peuvent être représentés dans l'espace canonique délimité par les deux fonctions discriminantes. Lorsque les surfaces délimitées par les groupes géologiques se chevauchent (ce qui est le cas ici), il est préférable, pour l'interprétation, de se limiter à représenter, les centroides des groupes (figure 6.2) et à indiquer la distribution des bassins versants selon leur groupe géologique pour chacune des surfaces d'appartenance. On note que les centroïdes des groupes 3 et 5 sont très voisins l'un de l'autre et s'opposent aux centroïdes des groupes 2 et 4 sur l'axe 1. Le groupe 1 se distingue des autres groupes par sa position extrême sur l'axe 2.

Les lacs des groupes 1 (marbre, roche calcosilisatée), 3 (migmatites, paragneiss, gneiss et gneiss granitiques) et 5 (granite et quartzite) sont caractérisés par des fortes teneurs en calcium, magnésium, potassium et sulfates et de faibles teneurs en aluminium et en ions H^+. Les lacs des groupes 2 (anorthosite, gabbro et diorite) et 4 (mangérite et monzonite) sont au contraire caractérisés par de faibles teneurs en calcium, magnésium, potassium et sulfates et de fortes teneurs en aluminium et ions H^+. Les lacs des groupes 3 et 5 ont des profils très voisins l'un de l'autre; par contre les lacs du groupe 1 se distinguent nettement des lacs des groupes 3 et 5 par les valeurs beaucoup plus élevées de calcium. Le groupe 4 se différencie du groupe 2 par des valeurs plus élevées d'aluminium et de potassium.

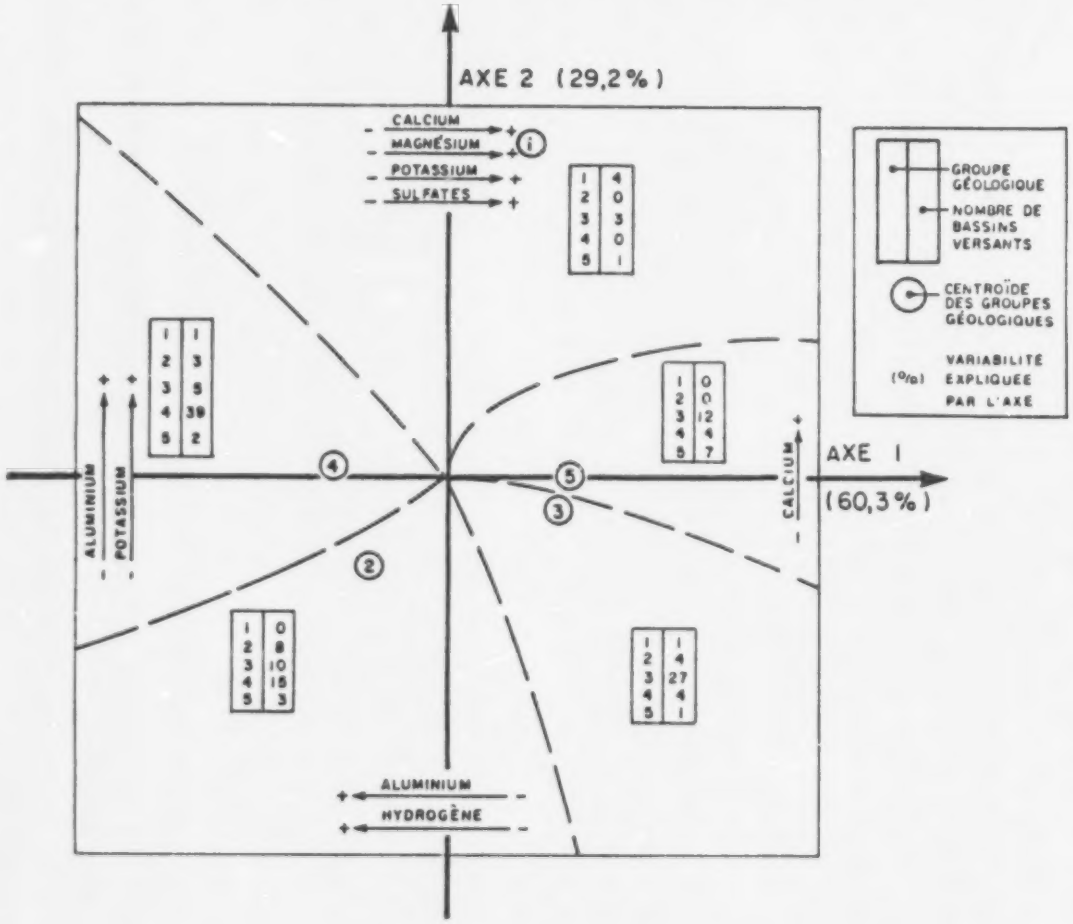


FIGURE 6.2: Représentation dans l'espace canonique des centroïdes des groupes de bassins versants et de la distribution des bassins versants selon leur groupe géologique pour chacune des surfaces d'appartenance.

Si on compare l'appartenance actuelle aux groupes géologiques avec l'appartenance prédite à partir de l'analyse discriminante, on trouve que 55% des lacs sont classés de façon identique (tableau 6.2). Il faut rappeler ici que l'analyse discriminante ne considère que la roche dominante dans chaque bassin versant (figure 6.1). Il est possible que le taux d'altération de la roche non-dominante soit plus élevé que celui de la roche dominante ayant servi à classer les bassins versants. Cette possibilité peut alors expliquer une partie plus ou moins importante de la variabilité observée (différence entre l'appartenance prédite et observée). Le niveau de concordance obtenu par l'analyse discriminante traduit bien l'influence de la géologie sur la composition chimique de l'eau des lacs malgré la grande hétérogénéité de la roche dominante dans la région étudiée(cf. annexe A) et malgré le choix du type de roche dominant dans chaque bassin versant (qui a été établi selon la superficie occupée et le niveau d'altérabilité de la roche en place).

6.3 Conclusion

- Une partie importante de la composition chimique de l'eau des lacs est explicable par la géologie de la roche dans les bassins versants. A partir d'une classification initiale des lacs en cinq groupes obtenue de la géologie, une analyse discriminante effectuée sur les données physico-chimiques a permis d'identifier que 55% des lacs se retrouvaient à l'intérieur de cette classification.

- Les variables physico-chimiques qui se sont avérées être les plus discriminantes sont le calcium, le magnésium, le potassium, les sulfates, l'aluminium et les ions H^+.
- La présence des sulfates comme variable discriminante importante peut être interprétée comme le résultat d'une classification automatique des variables et peut être expliquée de deux façon par:

  - une contribution possible en sulfates de certaines roches (telles la pyrite, la chalcopyrite et les sulfures métalliques) même présentes en très faible quantité;

un gradient S.O.-N.E. des apports atmosphériques en sulfates qu'on retrouve associé avec le gradient de minéralisation déjà observé dans cette direction (cf. section 5.3). Le poids de cette variable serait donc augmenté due à une coïncidence entre les valeurs de concentration de sulfates et les valeurs reliés à la minéralisation.

- Les lacs des groupes 1 (marbre, roche calcisilocatée), 3 (migmatites, paragneiss et gneiss granitiques) et 5 (granite et quartzite) se distinguent des lacs des groupes 2 (anorthosite, gabbro, diorite) et 4 (mangérite et monzonite) par des teneurs plus élevées en calcium, magnésium, potassium et sulfates et plus faibles en aluminium et ions H^+. Les granites et les quartzites généreraient-ils des teneurs plus fortes en Ca, Mg et SO_4 que les anorthosites gabbros et diorites? Ceci semble en contradiction avec la cartographie de Shilts (1981) et peut s'expliquer par la présence de deux ou plusieurs types de roches (cf. annexe A) dans un bassin versant ou par la composition minéralogique des dépots meubles qui serait différente de la nature de la roche en place dans un bassin versant.

- Le manque d'information sur la composition minéralogique et chimique des dépots meubles et la diversité de la composition géologique de plusieurs bassins versants peuvent expliquer le manque de discrimination que l'on observe entre les groupes 3 et 5 ainsi qu'entre les groupes 2 et 4.

Cette analyse pourrait être raffinée en procédant à une classification plus détaillée des types de roches ou en regroupant certaines roches dans tel groupe plutôt que tel autre. L'identification de la roche dominante est parfois difficile à effectuer lorsque plusieurs roches de nature différente sont présentes en même temps dans le bassin versant. De plus la composition des dépôts meubles a été assumée être la même que celle de la roche en place sous-jacente. Sur certains bassins, le transport glaciaire peut avoir modifié considérablement la composition minéralogique des dépôts.

7. ANALYSE DES INTERRELATIONS ENTRE LES VARIABLES BIOPHYSIQUES ET GÉOLOGIQUES

L'analyse effectuée précédemment a permis d'identifier des relations entre la qualité de l'eau et certaines variables biophysiques (physiographie, végétation) et géologiques du milieu. Dans ce qui suit, on vise, par l'emploi d'autres techniques statistiques (homogénéisation des données, analyse factorielle des correspondances) à analyser globalement les relations entre la physiographie, la végétation et la géologie, à déterminer sur la région étudiée des zones homogènes par rapport à l'ensemble de ces variables et à caractériser ces zones en fonction de leur niveau de sensibilité à l'acidification.

7.1 Démarche utilisée

L'analyse factorielle des correspondances (AFC) et la classification ascendante hiérarchique (CAH) sont les deux techniques statistiques multivariées qui ont été choisies pour analyser le comportement spatial de l'ensemble des variables du milieu. Une description des principales caractéristiques de ces deux méthodes a été donnée par Lachance et al. (1979).

L'analyse factorielle des correspondances (Benzecri et al., 1976; Lebart et Fenelon, 1973) est une méthode qui permet d'obtenir des représentations synthétiques de vastes tableaux à deux dimensions et d'en décrire les principales caractéristiques. Il s'agit en fait d'une analyse en composantes principales considérant une métrique (distance) particulière entre points représentatifs; cette méthode possède de nombreux avantages sur l'analyse en composantes principales (symétrie et stabilité en particulier).

De manière sommaire, l'AFC permet de déterminer les axes principaux du nuage des points variables et du nuage des points stations et de projeter ensuite simultanément les points de chaque nuage dans le plan des axes principaux pris deux à deux. Dans ce mode de représentation, la proximité entre deux points variables ou deux points stations indique une similitude de variation ou de comportement. Lorsqu'on superpose les plans des axes obtenus pour les variables et ceux obtenus pour les stations, on peut caractériser

chaque groupe de stations par une ou plusieurs variables d'après leur proximité ou leur éloignement du groupe de stations. En effet, en vertu du principe barycentrique spécifique à l'AFC, chaque point variable (ou point station) est en projection sur un axe, le barycentre, à un coefficient près, des points stations (ou points variables).

Une autre particularité de l'AFC consiste en la possibilité de considérer dans l'analyse des points supplémentaires (représentatifs de variables ou de stations). Ces points n'ayant aucun poids dans l'analyse, ils ne conditionnent pas la détermination des axes principaux, mais ils peuvent cependant être représentés graphiquement dans l'espace factoriel. Leur position dans l'espace factoriel peut fournir une aide utile dans l'interprétation.

Suite à l'application de l'AFC, l'examen des proximités entre les points dans l'espace factoriel est rendu plus objectif et plus systématique par l'utilisation de la méthode de classification ascendante hiérarchique (Jambu, 1978). Tel que mentionné précédemment, la CAH permet, à partir des distances entre chaque paire de points, de regrouper de manière automatique et selon des critères d'agrégation choisis, les points observations ou les points variables en classes et d'ordonner les groupes de points de façon à visualiser la hiérarchie du classement.

Pour atteindre l'objectif défini précédemment, l'approche utilisée consiste à choisir parmi l'ensemble des données disponibles un certain nombre de variables du milieu qui sont importantes dans la détermination de zones plus ou moins sensibles à l'acidification et dont la gamme de variation permet une telle analyse. Les variables retenues pour cette analyse sont les 19 variables du milieu utilisées dans l'analyse précédente (cf. section 5.1) auxquelles on ajoute les dix variables géologiques correspondant aux dix groupes de roches définies précédemment (cf. section 4.3). Dans le but d'ajouter des éléments d'interprétation, on a retenu également les quatre variables physico-chimiques (pH, SO_4, alcalinité, Ca + Mg) utilisées dans l'étude précédente de Bobée et al. (1983) pour définir des zones homogènes sur la région d'étude. Ces quatre variables sont cependant considérées dans l'analyse en tant que variables supplémentaires.

Codage binaire

La matrice de données à partir de laquelle sera effectuée l'analyse de la variabilité spatiale comporte un grand nombre de variables qui ont des échelles et des gammes de variation différentes. Afin de rendre applicable la méthode d'AFC, on a homogénéisé les données en procédant à un codage binaire. Dans ce codage, chaque valeur obtenue pour une variable est transformée en un vecteur contenant des "0" et un "1". La dimension du vecteur est égale au nombre de classes choisi, chaque classe correspondant à un intervalle de variation. La position du "1" dans le vecteur exprime donc dans quelle intervalle de variation se situe la valeur du paramètre.

Pour les 19 variables biophysiques et pour les quatre variables physico-chimiques, on a choisi de distinguer trois classes quasi-équiprobables (c'est-à-dire d'effectifs à peu près identiques). Les seuils utilisés pour le codage de ces variables en trois classes sont donnés au tableau 7.1. La classe 1 représente une valeur de variable plus petite ou égale au seuil inférieur, la classe 2, une valeur plus grande que le seuil inférieur et plus petite ou égale au seuil supérieur et la classe 3 une valeur plus grande que le seuil supérieur. Par exemple une valeur d'altitude égale à 290 m est remplacée par le vecteur (1, 0, 0) alors qu'une valeur de 390 m se traduit par (0, 1, 0).

En ce qui concerne les variables géologiques, les données recueillies (annexe A) ont été disposées dans un tableau de dix colonnes, chaque colonne correspondant à un des groupes définis précédemment et représentant la superficie relative occupée sur le bassin versant par un des types de roches du groupe. Les données géologiques se présentent donc sous une forme de présence-absence à l'intérieur des dix groupes de roches. Ce tableau est donc analogue au tableau des données binaires obtenues à partir des autres variables du milieu et peut être juxtaposé à celui-ci pour l'analyse par l'AFC.

Tableau 7.1: Seuils inférieurs et supérieurs utilisés pour le codage des variables en trois classes.

variables	seuils	
	inférieur	supérieur
Actives		
altitude (m)	350	480,0
superficie B.V. (km^2)	0,710	1,220
superficie lac (km^2)	0,102	0,167
superficie tourb. (km^2)	0,001	0,015
précipitation (mm)	1000,0	1100,0
sup. B.V./sup. lac	6,06	8,6
S.-O.,N.-E.	1,8	13,0
N.-O.,S.-E.	-4,3	6,0
ROC + (R+TM) (%)	2,1	3,65
TM/R (%)	13,0	26,2
TM (%)	17,0	31,4
TE (%)	12,5	29,0
ORG (%)	0,15	1,05
AR(F) (%)	1,6	10,5
AR(E) (%)	0,7	13,0
AF(F) (%)	1,3	11,7
AF(E) (%)	7,0	48,5
CP + CT (%)	0,2	27,0
VMH (%)	0,25	1,6
Supplémentaires		
pH	5,85	6,35
Ca + Mg (uéq/l)	140,0	240,0
alcalinité (uéq/l)	55,0	145,0
SO (uéq/l)	85,0	119,0

7.2 Analyse des interrelations entre variables

L'AFC a été appliquée sur le tableau des données binaires comprenant 67 colonnes (19 variables biophysiques divisées en trois classes et 10 variables géologiques) et 158 lignes (bassins versants). Au moyen de cette méthode, on obtient une représentation synthétique dans un espace factoriel de ce vaste ensemble de valeurs. Les premiers axes principaux de cet espace expliquent les pourcentages de variabilité suivants par ordre décroissant:

axe factoriel	1	2	3	4	5
variabilité relative (%)	8,9	8,6	6,1	5,4	5,1
variabilité relative cumulée (%)	8,9	17,5	23,6	29,0	34,1

Les premiers axes principaux expliquent de faibles pourcentages de variabilité de telle sorte qu'il faut considérer au moins 15 axes pour en expliquer environ 65%.

7.2.1 Groupement des points variables

La projection des points variables sur les plans des premiers axes principaux pris deux à deux permet généralement de décrire les principales interrelations entre variables et de donner un sens physique aux premiers axes principaux. Cependant, l'examen des proximités entre les points, dont découle l'interprétation, est ardu en raison du nombre élevé de points représentés (67) et du grand nombre d'axes factoriels à considérer (15). On a donc appliqué la CAH aux coordonnées des points variables dans l'espace factoriel afin d'analyser les proximités entre points variables. On a ainsi obtenu une classification des points variables en six groupes (figure 7.1). L'examen de la composition des six groupes (tableau 7.2) et de la position

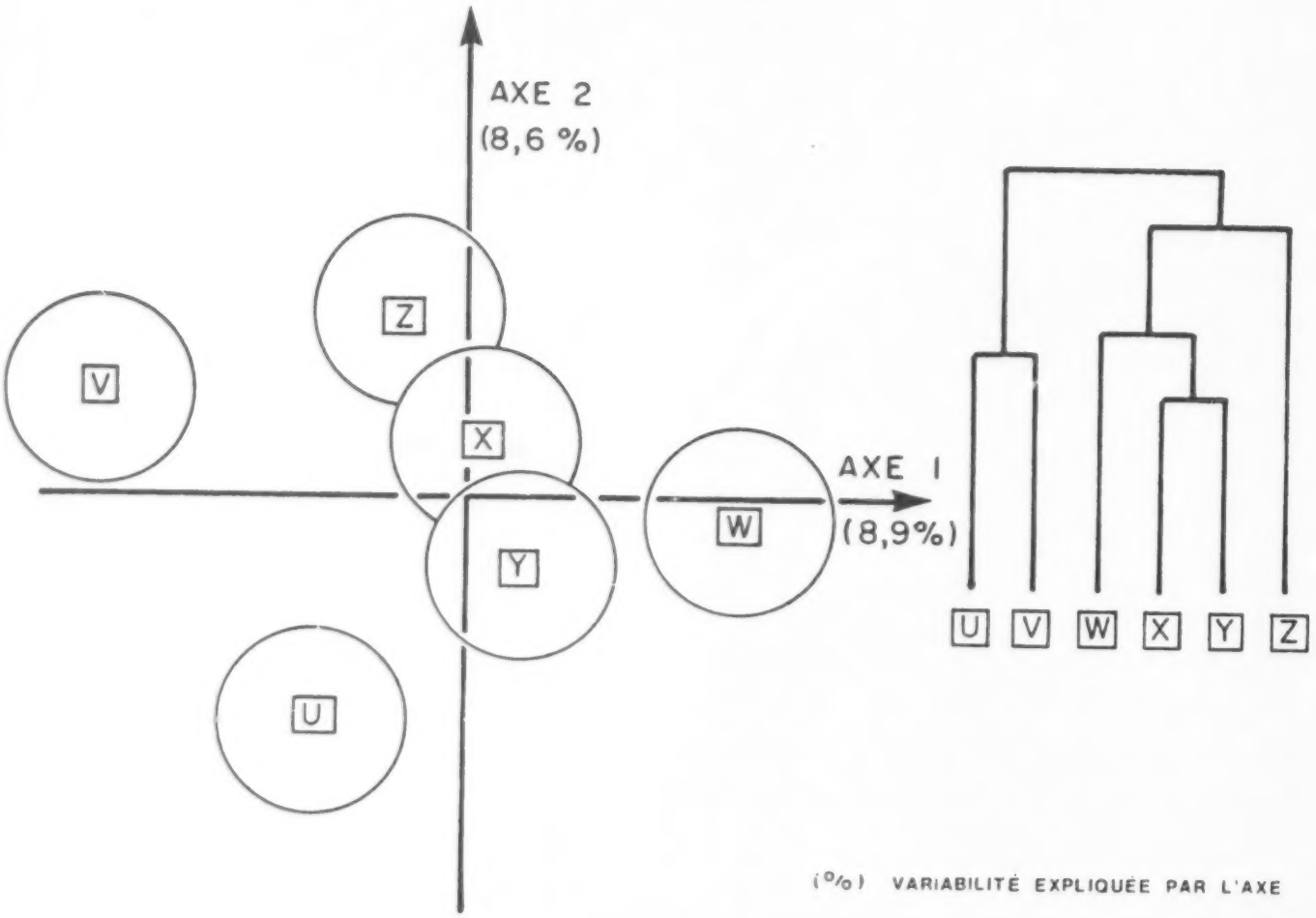


FIGURE 7.1: Classement hiérarchique des groupes de points variables et représentation dans le plan des axes principaux 1 et 2 des centres de gravité des groupes de points variables.

Tableau 7.2: Répartition des classes des variables entre les six groupes de la CAH.

variables	classes des variables composant le groupe					
	U	V	W	X	Y	Z
altitude	E		I			F
superf. B.V.	I			F	E	
superf. lac				I	E	F
superf. tourb.		F	E		I	
précipitation	E			I		F
sup. B.V./sup. lac				F	I	E
S.-O.,N.-E.	E		I			F
N.-O.,S.-E.	F		E		I	
ROC + (R+TM)	E		F			I
TM/R			F	I		E
TM			F	E		I
TE	F		E			I
ORG		F	E		I	
AR(F)	E				I	F
AR(E)	E				F	I
AF(F)				F	E	I
AF(E)	F		I			E
CP + CT	E		I			F
VMH		F	E		I	
Groupes de Roches: 1						*
2				*		
3					*	
4			*			
5						*
6				*		
7				*		
8	*					
9						*
10						*
pH	F		I			E
Ca + Mg	F		I			E
Alcalinité	F		I			E
SO_4	F		I			E

F: valeurs faibles
I: valeurs intermédiaires
E: valeurs élevées
*: présence des types de roches de ce groupe dans le groupe de la CAH.

des centres de gravité de ces groupes dans le plan des premiers axes principaux (figure 7.1) permet l'interprétation des interrelations entre les groupes et l'attribution d'un sens physique aux premiers axes factoriels.

7.2.2 Composition des groupes

L'axe 1 met principalement en opposition les groupes V et W alors que l'axe 2 est déterminé surtout par l'opposition entre les groupes U et Z (figure 7.1). A partir de la composition des groupes V et W qui comprennent respectivement les points représentant les superficies faibles et élevées de tourbières, de dépôts organiques et de végétation de milieu humide (tableau 7.2), on voit donc que l'axe principal 1 explique la variabilité spatiale des facteurs du milieu reliés à la présence de substances organiques. La répartition dans les groupes U et Z des valeurs faibles et élevées de la variable S.O.-N.E. indique que l'axe 2 exprime l'évolution des facteurs du milieu selon l'axe S.O.-N.E. (position des lacs dans la région étudiée).

On peut identifier les variables qui sont bien reliées entre elles en examinant si les points représentant la même classe ou la classe opposée se retrouvent dans le même groupe ou dans un groupe très voisin. On trouve ainsi que les superficies de tourbières, de dépôts organiques et la présence de végétation de milieu humide sont associées entre eux sur tout leur intervalle de variation puisque les points représentant les classes faibles, intermédiaires et élevées se retrouvent respectivement dans les groupes V, Y et W. Un autre groupe de variables interreliées est composé de l'altitude, de la direction S.O.-N.E., de la coupe et de l'arboré feuillu dense, indiquant que selon l'axe S.O.-N.E., l'altitude et les superficies de coupe augmentent alors que les superficies de feuillu dense diminuent.

En examinant la répartition à l'intérieur des groupes des valeurs faibles, intermédiaires et élevées, on arrive à déterminer six ensembles de variables plus ou moins interreliées (tableau 7.3). Le premier ensemble comprend les superficies de tourbières, de dépôts organiques et de végétation de milieu humide qui sont des variables fortement reliées entre elles. La quantité de précipitation, le résineux à faible densité et le résineux dense appartiennent au deuxième ensemble, car leur évolution spatiale suit assez bien celle de l'altitude.

Tableau 7.3: Classement des variables biophysiques d'après leur profil de variation.

	profil			[1]	composition
	F	I	E		
ensemble de variables interreliées	V	Y	W		superf. tourb., dépôts organiques, VMH
	Z	W	U		altitude, coupe, direction S.-O.,N.-E.
	U	W	Z		feuillu dense
	Z	X	U		précipitation
	Z	Y	U		résineux à faible densité
	Y	Z	U		résineux dense
	W	Z	U		ROC + (R+TM)
	U	Z	W		TE
	W	X	Z		TM/R
	W	Z	X		TM
	X	U	Y		superf. B.V.
	Z	X	Y		superf. lac
	X	Y	Z		superf. B.V. / superf. lac
	X	Z	Y		feuillu à faible densité
	U	Y	W		direction N.-O.,S.-E.

[1] F: valeurs faibles
I: valeurs intermédiaires
E: valeurs élevées

Le troisième ensemble est formé des variables ROC + (R+TM) et TE; il est tout à fait normal de trouver que la superficie de till épais diminue lorsque la superficie de roc et de roc + till mince augmente pour un bassin versant donné. Dans le quatrième ensemble, on a placé les variables TM/R et TM; ces deux variables sont inversement reliées seulement au niveau des valeurs intermédiaires et élevées. Le cinquième ensemble comprend la superficie du bassin-versant, la superficie du lac, le rapport superficie du bassin versant / superficie du lac et la superficie de feuillu à faible densité. Il n'y a pas d'explication pour l'association de ces variables. La variable N.O.-S.E. qui exprime la distance par rapport au fleuve ressort comme particulière.

Les points représentant les variables géologiques se répartissent à l'intérieur de chacun des groupes à l'exception du groupe V (tableau 7.2). En raison du plus faible poids de ces variables dans l'analyse (il s'agit en fait d'une variable divisée en 10 groupes et possiblement d'un comportement spatial particulier, ces variables ont en général une qualité de représentation plutôt faible. Leur variabilité expliquée (contribution relative) sur les 15 premiers axes principaux est la suivante:

Groupe de roches	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
variabilité expliquée	0,20	0,68	0,10	0,46	0,32	0,50	0,48	0,53	0,13	0,35

La variabilité expliquée pour les roches des groupes 1, 3 et 9 est beaucoup trop faible, si on considère celle expliquée pour l'ensemble des 67 points variables (0,65). Les points représentant ces trois groupes de roches se retrouvent alors près du centre de gravité du nuage de points et l'appartenance d'un point à un groupe donné peut n'avoir aucune signification physique. Quant aux autres groupes de roches pour lesquelles la variabilité expliquée est plutôt faible (4, 5, 6, 7, 8, 10), leur position dans l'espace factoriel peut être interprétée, mais avec prudence.

Les roches du groupe 8, qui comprend la mangérite, la monzonite et des roches charnockitiques, et qu'on retrouve en abondance dans la région étudiée (cf. section 4.3), appartiennent au groupe U. la composition du groupe U indique que ces types de roches prédominent au nord-est de la région étudiée et qu'ils sont situés dans une zone comprenant:

- des valeurs élevées de précipitation et d'altitude,
- des superficies élevées d'arboré résineux (faible et forte densité), de coupe, de roc et till mince sur roc (ROC + (R+TM)),
- de faibles superficies de till épais et de feuillu dense.

Les roches du groupe 4 comprennent des migmatites (grises), des migmatites à trames de gneiss et les paragneiss et granites associés (cf. section 4.3). Le point représentant ces types de roches appartient au groupe W (tableau 7.2); ces types de roches prédominent donc au centre de la région étudiée (valeur intermédiaire de la position S.O.-N.E.) où on retrouve en abondance de grandes superficies de till épais, de dépôts organiques, de tourbières et de végétation de milieu humide et en faibles superficies les différentes catégories de till mince (TM, TM/R, ROC+(R+TM)).

Dans le groupe Z, on retrouve les roches des groupes 1, 5, 9 et 10 qui sont de nature très différente (cf. section 4.3). En effet, le marbre et les roches calcosilicatées (groupe 1) sont beaucoup plus altérables que les paragneiss de Grenville (groupe 5); ces derniers sont également beaucoup plus altérables que les granites, gneiss granitiques et granodiorites (groupe 9) et que les quartzites (groupe 10). La composition du groupe Z indique que ces quatre groupes de roches se retrouvent en abondance dans la partie sud-ouest de la région étudiée, zone la plus hétérogène. Dans cette zone, l'altitude, la précipitation, les superficies de coupe, d'arboré résineux à faible densité et les superficies des lacs ont des valeurs faibles, alors que les rapports superficie du bassin versant / superficie du lac, les superficies de till mince sur roc et d'arboré feuillu dense ont des valeurs élevées.

Les roches des groupes 2, 6 et 7 se retrouvent à l'intérieur du groupe X (tableau 7.2). Ces roches sont les suivantes:

groupe de roches	types de roches
2	anorthosite, gabbro, anorthosite gabbroïque
6	gneiss, gneiss gris, complexe gneissique
7	gneiss à biotite, gneiss à pyroxène, gneiss granitiques, gneiss à amphibole

A partir de la composition du groupe X, on remarque que ces roches sont associées à la présence de grandes superficies de till mince et de superficies moins grandes de till mince sur roc. Les superficies de bassin versant, les rapports superficie du bassin versant / superficie du lac et les superficies de feuillu à faible densité ont des valeurs faibles. La localisation de ces groupes de roches selon l'axe S.O.-N.E. est plutôt mal définie.

La diorite et la diorite à pyroxène (roches du groupe 3) se retrouvent dans le groupe Y (tableau 7.2). L'association de ces types de roches à l'ensemble des caractéristiques biophysiques de ce groupe est plutôt mal définie en raison de la faible variabilité expliquée pour le point représentant ces types de roches.

7.2.3 Variables supplémentaires

Parmi les données retenues pour l'analyse de la variabilité spatiale, on a retenu comme variables supplémentaires les quatre variables physico-chimiques (pH, SO_4, alcalinité, Ca + Mg) utilisées dans l'étude précédente de Bobée et al. (1983). Comme pour les variables actives, un codage binaire a été effectué; les seuils utilisés pour les coder en trois classes sont fournis au tableau 7.1.

A partir des résultats de l'AFC, on calcule la position, dans l'espace factoriel, des points représentant les classes de ces variables et on interprète leur position par rapport aux proximités avec les six groupes de variables actives.

La répartition des points variables supplémentaires à l'intérieur des groupes est donnée au tableau 7.2. On constate que les points représentant les classes faibles, intermédiaires et élevées de ces variables se retrouvent respectivement dans les groupes U, W et Z. Rappelons que ces trois groupes expriment par leur position dans l'espace factoriel l'évolution selon l'axe S.O.-N.E. de facteurs du milieu tels que l'altitude, la précipitation, les superficies de coupe, d'arboré feuillu dense et de résineux à faible et forte densité. La répartition des points supplémentaires parmi ces trois groupes indique que les variables physico-chimiques ont des valeurs élevées dans la partie sud-ouest et diminuent plus ou moins graduellement dans la direction nord-est. L'altitude, la précipitation et le type de végétation (arboré feuillu dense, arboré résineux à faible et forte densité, coupe) apparaissent donc comme des variables biophysiques les plus reliées au comportement spatial des quatre variables physico-chimiques considérées.

7.3 Détermination de zones homogènes

En utilisant les coordonnées des points stations sur les 15 premiers axes factoriels, on a obtenu, par l'application de la CAH, une classification des bassins versants en cinq groupes. La représentation de la hiérarchie du classement est indiquée à la figure 7.2; la structure de la hiérarchie montre que les groupes 1 et 5 se retrouvent très distants des autres groupes alors que les groupes 2, 3 et 4 se distinguent moins nettement entre eux.

L'interprétation de la signification du classement obtenu est faite en représentant simultanément dans l'espace factoriel les centres de gravité des groupes de points variables et des groupes de points stations et en

examinant les proximités entre points variables et groupes de points stations (figure 7.2). En effet, grâce à une des propriétés de l'AFC (effet barycentrique), une proximité plus ou moins grande d'un groupe de points stations implique une contribution plus ou moins grande de ces points variables à la formation du groupe de points stations.

Si on examine la figure 7.2, on constate par exemple que la formation du groupe 1 résulte d'une forte contribution des points variables composant le groupe U (cf. tableau 7.2). Pour chacun des groupes de bassins versants, la contribution de chacun des points variables a été calculée et classée en très forte, forte ou faible (tableau 7.4).

L'examen des contributions des points variables à la formation des groupes de bassins versants permet de définir les principales caractéristiques de chacun de ces groupes. On voit, par exemple, que le groupe 1 est caractérisé par des valeurs élevées de S.O.-N.E., d'altitude et de précipitation. Ce groupe est localisé au nord-est de la région étudiée. Les roches dominantes sont du groupe 8 (mangérite, monzonite, roches charnockitiques). Ce groupe est situé plutôt du côté du fleuve Saint-Laurent (valeurs faibles de N.O.-S.E.). Les superficies de tourbières, de dépôts organiques, de végétation de milieu humide, et d'arboré feuillu dense y sont très faibles alors que les superficies d'arborés résineux dense et celles de coupe y sont relativement importantes. Le groupe 5 est caractérisé d'une façon opposée à celle du groupe 1. Ce groupe, situé au sud-ouest de la région étudiée (valeurs faibles de S.O.-N.E.), est de plus faible altitude et est soumis à de plus faibles quantités de précipitations. La végétation arborescente est principalement composée de feuillu dense; on y trouve des roches du groupe 10 (quartzites). Les groupes 2, 3 et 4 se situent plutôt à l'intérieur des limites des caractéristiques principales des groupes 1 et 5. Par contre, ces trois groupes se différencient entre eux par des superficies plus ou moins importantes de tourbières, de dépôts organiques, de végétation de milieu humide (VMH), de roc et roc + till mince, de till épais ainsi que par une composition géologique différente. Une caractérisation plus précise et plus détaillée de chacun des groupes est obtenue en se référant aux valeurs moyennes (et aux écart-types) calculées pour chacune des variables et présentées à l'annexe C.

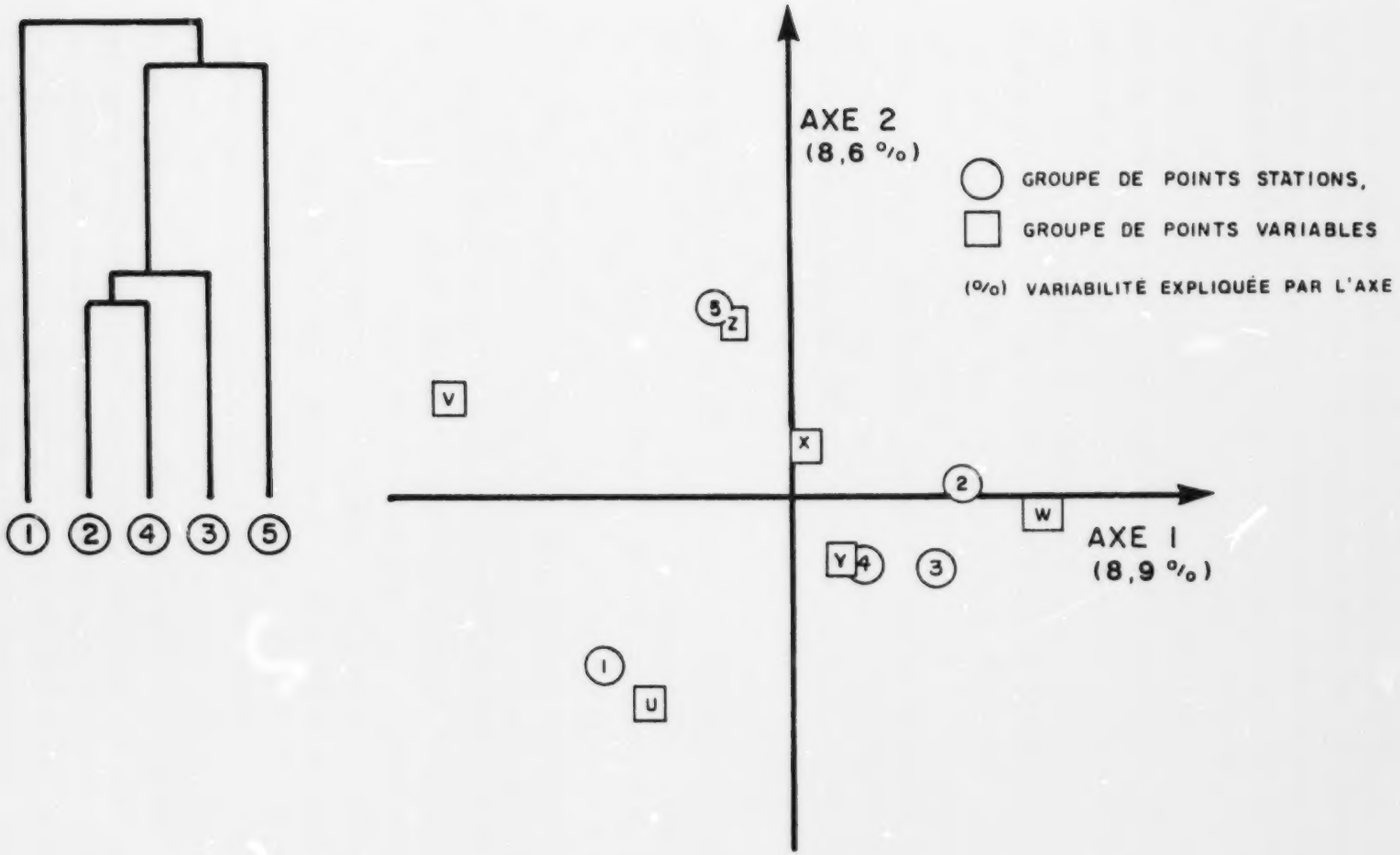


FIGURE 7.2: Classement hiérarchique des groupes de points stations et représentation simultanée dans le plan des axes principaux 1 et 2 des centres de gravité des groupes de points stations et des groupes de points variables.

Tableau 7.4: Points variables ayant une contribution à la formation des groupes de bassins versants.

variables	groupe de bassins versants				
	1	2	3	4	5
altitude	E**	I	I	E	F*
superf. B.V.		I		E*	F
superf. lac		I	E		
superf. tourb.	F	E**	I	E**	
précipitation	E**	I*			F**
sup. B.V./sup. lac				E	F
S.-O.,N.-E.	E**	I*	I*		F**
N.-O.,S.-E.	F		E	E	
ROC + (R+TM)	E	F	F*	I**	
TM/R		F	F	I	
TM			F		
TE			E*	I*	
ORG	F	E**		E	
AR(F)		E			F
AR(E)	E		F	I	
AF(F)			E		I
AF(E)	F	I*			E**
CP + CT	E		I,E		F
VMH	F	E*	I	E	F
Groupes de Roches 1					
2		X			
3					
4			X		
5					
6					
7					
8	X*				
9					
10					X

** : contribution très forte

* : contribution forte

: contribution faible

X : présence des types de roche de ce groupe dans le groupe de bassins versant

L'identification du groupe, auquel chaque bassin versant appartient a été reportée sur la carte de la région étudiée (figure 7.3). Les cinq zones géographiques délimitées par Bobée et al. (1983) sont également indiquées sur cette figure. Tel que reconnu précédemment à partir de l'analyse des caractéristiques des groupes, on voit que les bassins versants du groupe 5 se retrouvent dans la vallée de l'Outaouais au sud-ouest de la région étudiée alors que les bassins versants du groupe 1 délimitent une zone qui recouvre presqu'essentiellement la réserve des Laurentides au nord de Québec. Les bassins versants des groupes 2, 3 et 4 se retrouvent disséminés un peu partout dans la partie centrale de la région étudiée.

L'examen de la répartition des bassins versants des différents groupes à l'intérieur des zones délimitées antérieurement (figure 7.3) révèle certaines différences. On voit immédiatement que la région, délimitée par les bassins versants du groupe 5, recouvre presque complètement les zones 4 et 5 et que la région où se retrouve les bassins versants du groupe 1 comprend la zone 1 et s'étend plus à l'est dans la zone 3.

Si on examine plus en détail la répartition des bassins versants des cinq groupes dans les zones délimitées antérieurement (tableau 7.5), on constate que les zones 1 et 5 avec 20 et 21 lacs respectivement ont plus de 85% des bassins versants classés de façon correspondante. Parmi les trois autres zones, seule la zone 2 a une majorité de bassins versants classés dans le groupe correspondant. Si on considère l'ensemble de la région étudiée, 40,5% des bassins versants sont classés dans un groupe correspondant à la zone déterminée antérieurement.

Il faut se rappeler que les cinq zones géographiques ont été délimitées par Bobée et al. (1983) en se basant à la fois sur l'appartenance a un groupe homogène déterminé à partir de la physico-chimie et sur une connaissance à priori de la physiographie du territoire. En effet, on retrouve seulement 65% des lacs de la région étudiée dont le groupe déterminé à partir de la physico-chimie correspond à la zone. La délimitation des zones géographiques quoiqu'un peu arbitraire, était utile pour définir le plan d'échantillonnage d'un futur réseau de surveillance de l'acidification des eaux de surface.

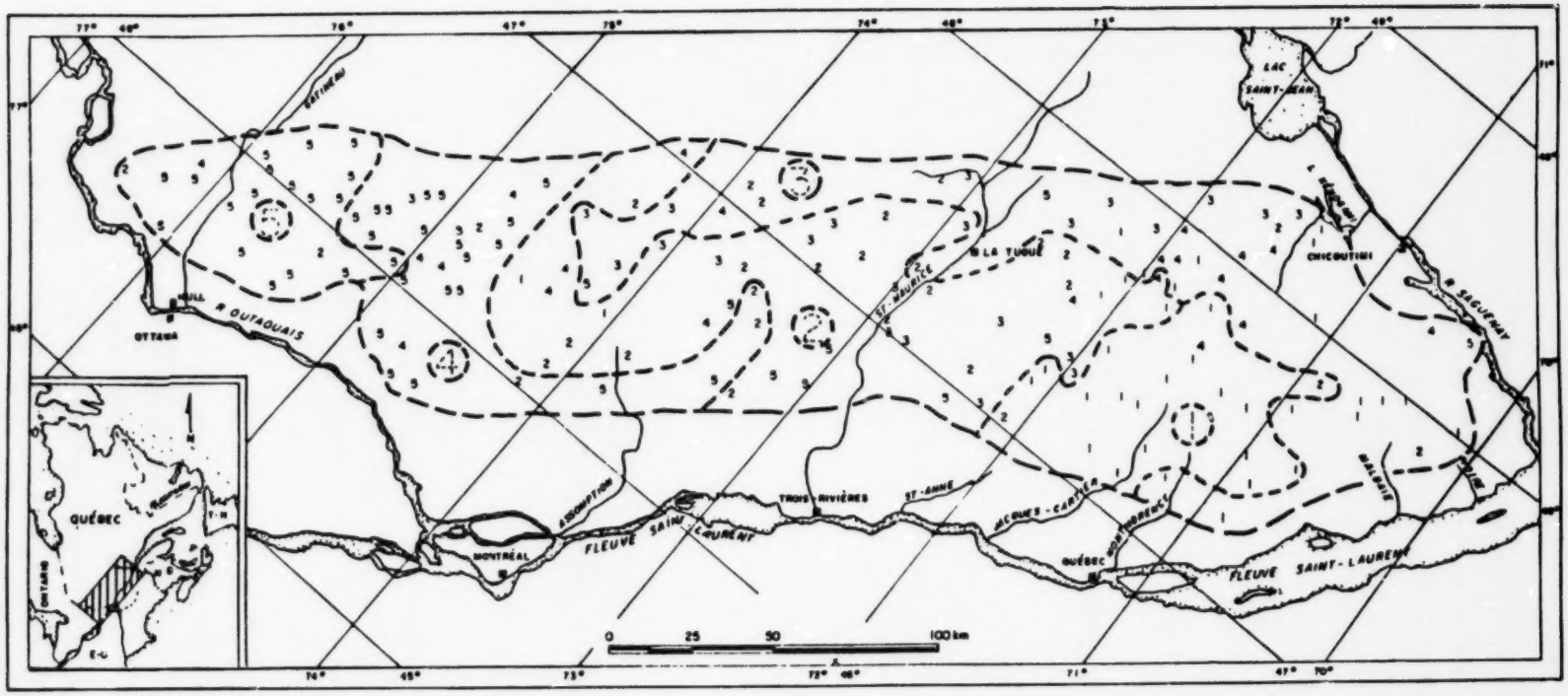


FIGURE 7.3: Classification des bassins versants selon les cinq groupes définis dans l'étude et délimitation des zones déterminées par Bobée et al. (1983)

Tableau 7.5: Répartition des bassins versants selon leur classification en cinq groupes et selon leur localisation à l'intérieur des cinq zones déterminées antérieurement par Bobée et al. (1983).

zone déterminée à partir de la physico-chimie	nombre de lacs par zone	nombre de bassins versants classés dans le groupe				
		1	2	3	4	5
1	20	17 (85,0)	2 (10,0)	0 (0,0)	1 (5,0)	0 (0,0)
2	44	5 (11,4)	16 (36,4)	12 (27,3)	6 (13,6)	5 (11,4)
3	43	15 (34,9)	7 (16,3)	9 (20,9)	9 (20,9)	3 (7,0)
4	30	0 (0,0)	4 (13,3)	1 (3,3)	4 (13,3)	21 (70,0)
5	21	0 (0,0)	2 (9,5)	0 (0,0)	1 (4,8)	18 (85,7)

( ) pourcentage de bassins versants classés par rapport à la zonation antérieure

Il est possible de redéfinir d'autres zones géographiques à partir des groupes homogènes déterminés dans cette étude. On pourrait par exemple considérer seulement trois zones géographiques en regroupant les régions couvertes par les groupes 2, 3 et 4 qui ont des caractéristiques un peu similaires. La zone 5 comprendrait toute la partie sud-ouest de la région étudiée (ancienne zone 4 et 5) tandis que la zone 1 comprendrait l'ancienne zone 1 et s'étendrait plus au nord-est dans l'ancienne zone 3.

7.4 Conclusion

- L'étude des interrelations entre les variables (biophysiques et géologiques) du milieu révèle les points suivants:

  - les variables reliées à la présence de dépôts organiques et de végétation de milieu humide sont fortement interreliées;
  - on observe également une forte interrelation entre les variables suivantes: altitude, précipitation, direction S.O.-N.E., superficie de coupe, d'arboré feuillu dense, d'arboré résineux à faible densité; les variables composant ce groupe ressortent comme les plus reliées à la minéralisation des lacs.

- L'analyse du comportement spatial de l'ensemble des variables du milieu (géologie, physiographie, végétation) a permis de distinguer sur la région étudiée cinq groupes de bassins versants.

- Cette classification des bassins versants en cinq groupes homogènes s'intègre bien à la zonation effectuée antérieurement par Bobée et al. (1983) à partir de la physico-chimie des lacs; 41% des bassins versants sont classés dans un groupe correspondant à la zone déterminée antérieurement.

- La zone délimitée par le groupe 1 est localisée au nord-est de la région étudiée et est caractérisée par une altitude élevée, des précipitations abondantes, de grandes superficies de résineux dense et de coupe (totale et partielle) et de faibles superficies de dépôts organiques, de végétation de milieu humide et d'arboré feuillu dense. Les

roches dominantes qu'on y retrouve sont la mangérite, la monzonite et les roches charnockitiques associées.

- La zone délimitée par le groupe 5 est localisée au sud-ouest de la région étudiée et est caractérisée d'une façon opposée à celle du groupe 1. Elle est caractérisée principalement par de plus faibles altitudes des bassins versants, des précipitations moins abondantes et d'importantes superficies d'arboré feuillu à forte densité. Les roches dominantes sont le marbre, les roches calcosilicatées, les gneiss, les paragneiss de Grenville, les granites et les quartzites.

- Les zones délimités par les groupes 2, 3 et 4 sont moins bien définies que les zones extrêmes et se retrouvent disséminés un peu partout dans la partie centrale de la région étudiée. Ces trois groupes de bassins versants se différencient entre eux par des superficies plus ou moins importantes de dépôts organiques, de végétation de milieu humide, de roc et till mince, de till épais, ainsi que par une composition géologique différente.

Cette nouvelle zonation effectuée à partir d'un ensemble de variables du milieu permet de mieux caractériser les limites des régions de sensibilité élevée (zone 1) ou faible (zone 5) à l'acidification.

En résumé, on voit donc qu'il est possible d'identifier des zones homogènes de sensibilité plus ou moins grande à l'acidification en se basant sur un ensemble de caractéristiques biophysiques et géologiques du milieu.

8. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La caractérisation géologique et biophysique des bassins versants de 158 lacs du sud du Québec a permis, après avoir analysé et interprété l'ensemble des variables du milieu, de dégager et d'identifier un certain nombre de relations entre ces mêmes variables et les paramètres physico-chimiques de la qualité de l'eau.

Dans un premier temps, on fera un retour sur les principales conclusions de chaque chapitre. Par la suite, on s'interrogera à savoir si les buts et objectifs de l'étude ont été atteints. Enfin après avoir cerné les faiblesses et lacunes de l'étude, on terminera par l'énoncé de recommandations d'ordre général et particulier.

8.1 Importance des variables géologiques et biophysiques (cf. section 4.4)

L'analyse détaillée des données inventoriées fait ressortir que:

- L'altitude et le taux de précipitation sont des variables interreliées. Leurs variations délimitent sur la région étudiée des zones homogènes bien définies.

- La végétation, sur le territoire considéré, semble être reliée à l'altitude et aux précipitations.

  - Dans la partie nord-est, où l'altitude est élevée et les précipitations abondantes, on rencontre surtout de l'arboré résineux.

  - Plus à l'ouest et dans la majeure partie de la région, c'est l'arboré feuillu qui domine avec une densité moyenne du couvert supérieure à 60%.

- Les principaux types de roches rencontrés dans la région étudiée sont de types charnockitiques (mangérite, monzonite, migmatites charnockitiques). Comme deuxième type, on rencontre les migmatites et on retrouve en troisième ordre de fréquence les paragneiss et gneiss de Grenville.

8.2 Relations entre les variables biophysiques du milieu et les variables de qualité de l'eau (cf. section 5.4)

- Les variables du milieu les plus fortement reliées au taux de minéralisation et au pH de l'eau des lacs sont l'altitude, les précipitations, la direction S.O.-N.E., les superficies d'arboré résineux à faible densité, les superficies d'arboré feuillu dense et les superficies de coupe.
- Les concentrations de sulfates dans les lacs varient inversement avec l'altitude, les précipitations et la direction S.O.-N.E. et indirectement avec le taux de minéralisation.

- Les variables décrivant les classes d'épaisseurs de dépôts sont faiblement reliées à la minéralisation et au pH des lacs. L'ensemble des données inventoriées n'a cependant pas permis de faire ressortir, pour un type de dépôt donné, un effet de la pente et du drainage sur le pH et la minéralisation de l'eau des lacs.

8.3 Relations entre les variables géologiques et physico-chimiques (cf. section 6.3)

- La physico-chimie de l'eau de 55% des lacs étudiés peut être expliquée par la géologie de la roche en place. En effet, à partir d'une classification initiale des bassins versants en cinq groupes, obtenus de la géologie, une analyse discriminante effectuée sur les données physico-chimiques de l'eau des lacs montre que 55% des lacs étudiés se retrouvent à l'intérieur de cette classification.
- Les variables physico-chimiques les plus discriminantes dans l'étude des relations existant entre la géologie et la qualité de l'eau sont: le calcium, le magnésium, le potassium, les sulfates, l'aluminium et, à un degré moindre, les ions hydrogène.

- Les bassins versants classés dans le groupe 1 (roches calcosilicatées et marbre), le groupe 3 (migmatites, paragneiss, et gneiss) et le groupe 5 (granite et quartzite) sont caractérisés par des eaux lacustres où les teneurs en calcium, magnésium, potassium et sulfates sont plus élevées et les teneurs en aluminium et ions hydrogène plus faibles que les eaux des bassins versants où on note la présence de roches du groupe 2 (anorthosite, galbro et diorite) et de roches du groupe 4 (mangérite et monzonite).

- La participation importante des sulfates comme variable discriminante peut s'expliquer de deux façons:

  - une contribution de différentes sources naturelles du milieu telles que certains types de roches (pyrite, chalcopyrite);
  - l'influence importante des apports atmosphériques en sulfates qui diminuent selon un gradient S.O.-N.E.

8.4 Analyse des interrelations entre les variables géologiques et biophysiques (cf. section 7.4)

L'analyse globale des relations entre les données géologiques et biophysiques nous a permis de délimiter sur la région étudiée des zones homogènes et de caractériser ces zones en fonction de leur niveau de sensibilité à l'acidification.

Ainsi on a pu déterminer:

- Des interrelations entre les variables suivantes: altitude, précipitation, direction S.O.-N.E., superficie de coupe, d'arboré feuillu dense, d'arboré résineux à faible densité. De plus ces variables sont apparues comme étant fortement reliées au taux de minéralisation des lacs.

- Une classification des bassins versants en cinq groupes homogènes à partir du comportement spatial de l'ensemble des variables du milieu. Cette classification s'intègre bien à celle effectuée par Bobée et al. (1983) puisque 41% des bassins versants se sont retrouvés dans des groupes correspondant aux zones déterminées antérieurement.

- Une meilleure caractérisation des régions de sensibilité élevée (zone 1) ou faible (zone 5) à l'acidification. Les zones 2, 3 et 4, moins bien définies, occupent la partie centrale de la région étudiée et sont caractérisées par des superficies plus ou moins importantes de dépôts organiques, de végétation de milieu humide, de dépôts meubles ainsi que par différents types de roches.

8.5 Revue des objectifs de l'étude

Grâce aux différents types d'analyses utilisés on a pu réaliser une grande partie des buts et objectifs fixés au début de l'étude.

Ainsi, on a identifié les principales variables physiographiques pouvant être responsable (augmenter, diminuer) du niveau de sensibilité et du pouvoir tampon des écosystèmes terrestres.

On a aussi pu relier certains types de végétation avec le taux de minéralisation de l'eau des lacs. Dans les bassins versants, où les superficies d'arboré feuillu dense occupent la majeure partie de la superficie totale, l'eau des lacs est plus minéralisée que dans les bassins versants où ce sont les superficies d'arboré résineux dense qui prédominent ($>$ 50% de la superficie totale).

On a également, à partir de l'analyse discriminante, identifié des types de roches pouvant être responsables jusqu'à un certain point des concentrations plus ou moins élevées de calcium, magnésium, potassium, sulfates, aluminium et ions hydrogène dans l'eau des lacs.

Finalement, par la description et l'analyse de l'ensemble des caractéristiques géologiques et biophysiques des écosystèmes terrestres, on a pu identifier et délimiter cinq zones homogènes de sensibilité différente. La zone 1 étant de sensibilité élevée, la zone 5 de faible sensibilité et les zones 2, 3, 4 étant des zones de transition . L'ensemble des données inventoriées ne nous a pas permis de distinguer et de déterminer un éventuel effet de l'épaisseur, de la pente et du drainage des dépôts meubles sur leur niveau de sensibilité et leur capacité de

neutralisation des retombées atmosphériques acides. Ceci est dû en grande partie à l'absence de données relatives à la nature, aux constituants minéralogiques et aux propriétés physiques et chimiques des dépôts meubles (roche mère pédologique) et des différents types de sols. Ces données n'ont pu être répertoriées à cause de leur non-disponibilité; les travaux de terrains ne comprenaient pas la collecte de ce type d'information.

8.6 Recommandations

Afin d'avoir une meilleure compréhension de l'impact des précipitations acides sur les différents types d'écosystèmes terrestres, on devrait chercher à connaître toutes les caractéristiques du milieu qui peuvent rendre, ou non, une zone (ou bassin versant) sensible aux effets des précipitations acides. A cette fin, et dans le but de connaître l'influence et l'impact des variables dont on n'a pas tenu compte au cours de la présente étude (telles que la nature et les propriétés physiques et chimiques des sols), nous recommandons:

- Pour connaître et évaluer l'éventuel effet de la pente, du drainage, de l'épaisseur et de la nature des dépôts et des sols sur le niveau de sensibilité et le pouvoir tampon des écosystèmes terrestres:

  - d'analyser et de comparer uniquement des bassins versants de nature géologique et biophysique homogène afin de n'avoir à considérer que la pente et le drainage ainsi que l'épaisseur et la nature des dépôts meubles comme variables explicatives;

  - de déterminer les caractéristiques hydrologiques (infiltration, écoulement de surface) de chaque bassin versant afin d'évaluer le temps de résidence de l'eau en contact avec la roche en place, les sols et les dépôts meubles;

  - de mesurer avec plus de précision les superficies et les volumes (dans certains cas) des tourbières et des sols à teneur élevée en matière organique et de mesurer in situ à différentes profondeur le pH de l'eau d'infiltration.

- Pour identifier et décrire les variables lithologiques et pédologiques contrôlant la sensibilité des écosystèmes terrestres aux précipitations acides:

  . d'échantillonner et d'analyser les différents horizons pédologiques ainsi que les dépôts de base sur lesquels ils se sont développés afin d'en connaître leur capacité d'échange cationique et d'identifier leurs principales bases échangeables;

  . d'identifier, pour chaque bassin versant, les constituants minéralogiques et chimiques des différentes formations géologiques et des dépôts meubles sus-jacents afin de découvrir la présence de métaux tels la pyrite et la chalcopyrite qui sont des constituants lithologiques pouvant contribuer de façon appréciable à l'apport de sulfates dans le bassin versant.

- Pour distinguer l'effet des différents types de végétation sur la sensibilité des écosystèmes terrestres et sur leur pouvoir de neutralisation:

  . d'identifier la présence de chaque type d'humus rencontré, de vérifier leurs relations possibles avec les différents types de végétation présents dans le bassin versant, d'évaluer la capacité d'échange cationique de chaque type et d'en identifier leurs bases échangeables;

  . de déterminer si différents types de végétation peuvent influencer le pouvoir tampon d'un bassin versant lorsque les dépôts de surface et l'assise rocheuse sont de composition minéralogique comparable.

- Pour évaluer l'influence du transport des dépôts meubles par les glaciers:

  . de déterminer dans quelle proportion la composition minéralogique des dépôts meubles est représentative de la composition minéralogique de l'assise rocheuse sous-jacente ou environnante.

Suite à l'application de ces recommandations, on sera probablement en mesure d'identifier et d'évaluer (quantitativement) les variables et processus responsables de l'acidification ou du pouvoir de neutralisation des bassins versants et ainsi de mieux expliquer la variation spatiale de la qualité de l'eau des lacs du sud du Québec.

RÉFÉRENCES

AVRAMTCHEV, L. et P. MARCOUX. (1980).
Carte géologique du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources, DP 0735.

BENZECRI, J.P. et coll. (1976).
L'analyse des données. Tome 2. L'analyse des correspondances. 2e édition. Dunod, Paris, 616 p.

BOBÉE, B., M. LACHANCE, J. HAEMMERLI, A. TESSIER, J.Y. CHARETTE, J. KRAMER. (1983).
Évaluation de la sensibilité à l'acidification des lacs du sud du Québec et incidence sur le réseau d'acquisition de données. INRS-Eau, Rapport scientifique no 157, 198 p., 4 annexes, 1 appendice.

FOUCAULT, A. et J.F. RAOULT. (1980).
Dictionnaire de géologie. Masson, Paris, 336 p.

GOUVERNEMENT DU CANADA. (1974).
Atlas national du Canada. Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources. 4ième édition revisée. Ottawa, (Ont.), 12 planches, 254 p.

GOUVERNEMENT DU CANADA. (1978).
Le système canadien de classification des sols. Publication 1646. Ministère de l'Agriculture du Canada. Commission canadienne de pédologie. Direction de la recherche. Ottawa, (Ont.)

GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. (1969).
Géologie et Richesses minérales du Québec. Ministère des Richesses naturelles. Québec, 18 p.

GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. (1981)
Carte des gîtes minéraux du Québec, Ministère de l'Energie et des Ressources, Service du potentiel minéral, 1981, DPV-809

GRANDTNER, N.M. (1966).
La végétation forestière du Québec méridional. Les Presses de l'Université Laval. Québec, 216 p.

HOUDE, A. (1978).
Atlas climatologique du Québec, température-précipitation. Service de la météorologie. Gouvernement du Québec. Ministère des Richesses naturelles, Direction générale des eaux. Québec, 42 planches, R.M.-36.

JAMBU, M. (1978).
Classification automatique pour l'analyse des données. Tome 1. Méthodes et algorithmes. Dunod, Paris, 389 p.

LACHANCE, M., B. BOBÉE et D. GOUIN. (1979).
Characterization of the water quality in the Saint-Lawrence river: determination of homogeneous zones by correspondence analysis. Water Resour. Res., 15: 1451-1462.

LEBART, L. et J.P. FENELON. (1973).
Statistique et informatique appliquées. Dunod, Paris, 2e édition, 457 p.

LEGENDRE, L. et P. LEGENDRE. (1979).
Écologie numérique. Tome 2: la structure des données écologiques. Collection d'Écologie, no 13. Masson, Paris et les Presses de l'Université du Québec. VIII + 254 p.

NIE, N.H., C.H. HULL, J.G. JENKINS, K. STEINBRENNER et D.M. BENT. (1975).
SPSS, Statistical package for the social sciences. McGraw Hill Book Company. Toronto, 675 p.

ROUSSEAU, C. (1974).

Géographie floristique du Québec-Labrador. Les Presses de l'Université Laval. Québec, 799 p.

ROWE, J.S. (1972).

Les régions forestières du Canada. Publication 1300 F. Ministère de l'Environnement. Service canadien des forêts. Ottawa, (Ont.)

SHILTS, W.W. (1981).

Sensibilité de la roche en place aux précipitations acides et modifications dues aux phénomènes glaciaires. Commission géologique du Canada. Étude 81-14, 7 p., 3 cartes.

UNITED STATES - CANADA, WORK GROUP I. (1983).

Memorandum of Intent on Transboundary Air Pollution. Impact Assessment Work Group I. United States. Canada. Final Report.

WILSON, C.V. (1971).

Le climat du Québec. Atlas climatique, première partie. Service météorologique du Canada. Ottawa.

ANNEXE A

BASSINS VERSANTS INVENTORIÉS: LOCALISATION ET GÉOLOGIE

ANNEXE A

BASSINS VERSANTS INVENTORIÉS: LOCALISATION ET GÉOLOGIE

No des lacs N	N1	N2	Nom du lac	Coordonnées Longitude	Latitude	Géologie (importance relative)
1	1	10	Lac de l'Aqueduc	744730	463230	Gneiss charnockitique (100%)
2	2	17	Baldwin	744330	462730	Paragneiss (35%), Monzonite (35%), Granite (30%)
3	3	21	Tortu	750700	462000	Gneiss à quartz , amphibole et pyroxène (70%), quartz (30%)
4	4	23	Baillargé	744900	461940	Paragneiss (25%), Monzonite (25%), Granite (50%)
5	5	26	David	753500	461830	Granite (50%), Migmatite (50%)
6	6	32	S.N. # 60775	744730	461500	Paragneiss (40%), Monzonite (30%), Granite (30%)
7	7	35	S.N. # 42734	754500	461200	Migmatite (100%)
8	8	37	S.N. # A6960	752900	461300	Calcaire cristallin (20%), gneiss à biotite (80%)
9	9	38	Castilly	751600	461030	Gneiss à biotite et porphyblastique (100%)
10	10	39	Kidney	751400	461230	Syénite (80%), diorite (20%)
11	11	40	Metcalfe	750000	461400	Migmatite (50%), paragneiss (50%)
12	12	42	Lac à l'Ours	745030	461000	Paragneiss (40%), monzonite (30%), granite (30%)
13	13	45	S.N. # 42888	755400	460330	Quartzite et paragneiss quartzofeldspathique (100%)
14	14	48	Trouvé	752730	460730	Gneiss à hornblende (100%)
15	15	50	Sourire	751230	460730	Quartzite (50%), calcaire cristallin (50%)
16	16	51	Griffin	750100	460430	Diorite gneissique (50%), calcaire cristallin (50%)
17	17	57	S.N. # 603	755000	460200	Marbre (50%), gneiss charnockitique (50%)
18	18	58	S.N. # 42839	754000	460100	Migmatite (60%), granite (40%)
19	19	59	Perch	753320	460240	Monzonite (100%)
20	20	68	Bohème	760700	455230	Granite avec pegmatite (100%)

N: Numéro des lacs N1: Numéro des lacs INRS-Eau N2: Numéro des lacs Environnement Canada

ANNEXE A

BASSINS VERSANTS INVENTORIÉS: LOCALISATION ET GÉOLOGIE

No des lacs N	N1	N2	Nom du lac	Coordonnées Longitude	Latitude	Géologie (importance relative)
21	21	75	Blais	751000	455600	Quartz (100%)
22	22	82	Sowden	760530	455000	Granite avec pegmatite (100%)
23	24	92	Lac aux Trois Pointes	745000	45100	Gneiss (100%)
24	25	93	Eléphant	744300	455200	Monzonite (100%)
25	26	95	S.N. # 71370	762400	455200	Paragneiss (50%), calcaire cristallin (50%)
26	27	96	Carlot	761300	454530	Paragneiss (50%), calcaire cristallin (50%)
27	28	101	Shéridan	753730	454400	Paragneiss mixtes à amphibolite (100%)
28	29	102	S.N. # 56003	752500	454330	Gneiss graphitic (50%), quartz (50%)
29	30	108	Carrier	744400	454600	Gneiss rouge (50%), granite (50%)
30	31	124	Clair	760400	453600	Gneiss à amphibole (50%), quartzite (50%)
31	32	2	Glacé	713200	481630	Monzonite (50%), granite avec pegmatite (50%)
32	33	3	Quatrième	712200	481700	Mangérite (100%)
33	34	5	S.N. # 34670	702140	481750	Mangérite (100%)
34	36	8	Lac des Vases	714000	481230	Granite avec pegmatite (50%), mangérite (50%)
35	37	10	S.N. # 86728	712230	481430	Complexe gneissique (100%)
36	38	16	Cazot	703430	481500	Migmatite (100%)
37	39	20	Lac des Deux Clubs	715800	480730	Mangérite (100%)
38	40	23	Chouinard	713400	481100	Complexe gneissique (50%), mangérite (50%)
39	41	24	Rolland	713130	480730	Mangérite (100%)
40	43	41	Cadieux	713600	480200	Mangérite (100%)

N: Numéro des lacs N1: Numéro des lacs INRS-Eau N2: Numéro des lacs Environnement Canada

ANNEXE A

BASSINS VERSANTS INVENTORIÉS: LOCALISATION ET GÉOLOGIE

No des lacs N	NI	N2	Nom du lac	Coordonnées Longitude	Latitude	Géologie (importance relative)
41	45	58	Sibyllin	720530	475440	Diorite, granodiorite (100%)
42	46	59	Consor	715840	475950	Complexe gneissique (100%)
43	47	61	Tréteau	714740	475520	Mangérite (50%), complexe gneissique (50%)
44	48	62	Harvey	713800	475500	Mangérite (100%)
45	49	66	S.N. # 86663	710630	480030	Gneiss charnockitique (100%)
46	51	70	S.N. # 35662	703330	475620	Gneiss charnockitique (100%)
47	52	71	Cantin	702700	475950	Mangérite (100%)
48	53	75	Noire	700830	475950	Mangérite (100%)
49	54	78	Oreille	722130	475300	Diorite, granodiorite (100%)
50	55	79	Chômeur	721300	475000	Mangérite (100%)
51	56	81	Tourlay	715800	475030	Mangérite (100%)
52	57	82	Magny	715430	475200	Granite avec pegmatite (100%)
53	58	86	Migneault	712310	475030	Mangérite (100%)
54	59	89	Pilote	705230	475130	Gneiss charnockitique (100%)
55	60	91	S.N. # 35694	703930	475320	Mangérite (50%), diorite (50%)
56	61	94	Thomas	701430	475300	Gneiss charnockitique (100%)
57	62	97	Purcell	723830	474540	Migmatite à biotite (50%), complexe gneissique (50%)
58	63	99	Armand	722630	474410	Anorthosite, anorthosite gabbroique (50%), Diorite (25%), granodiorite (25%)
59	64	102	Flavien	715900	474530	Mangérite (100%)

N: Numéro des lacs NI: Numéro des lacs INRS-Eau N2: Numéro des lacs Environnement Canada

ANNEXE A

BASSINS VERSANTS INVENTORIÉS: LOCALISATION ET GÉOLOGIE

No des lacs N	N1	N2	Nom du lac	Coordonnées Longitude	Latitude	Géologie (importance relative)
60	65	103	Dulong	715500	474720	Mangérite (100%)
61	66	104	Daniel	714820	474720	Complexe gneissique (100%)
62	67	105	Montraye	713500	474920	Mangérite (100%)
63	68	113	S.N. # 35759	703540	474930	Paragneiss mixtes, amphibolite (50%), gneiss granitique (50%)
64	69	122	S.N. # 87482	722200	473840	Gabbro, metagabbro, amphibolite (100%)
65	70	125	Congré	720140	474200	Mangérite (100%)
66	72	127	Lemaine	714610	474310	Gneiss charnockitique (100%)
67	73	129	Ecureuil	712940	474100	Anorthosite (70%), mangérite (30%)
68	74	133	des Enfers	705430	474340	Mangérite (50%), diorite (25%), granodiorite (25%)
69	75	141	S.N. 92844	730230	473830	Migmatite (100%)
70	76	145	Panache	723100	473640	Gneiss d'injection (50%), diorite (25%), granodiorite (25%)
71	77	147	S.N. # 87422	721530	473340	Complexe gneissique (100%)
72	78	148	du Casse-ligne	720540	473700	Mangérite (100%)
73	80	153	S.N. # 7810	713000	473815	Mangérite (75%), anorthosite (25%)
74	81	154	du Wapiti	711330	473610	Gneiss charnockitique (100%)
75	82	156	Fantôme	710610	473720	Mangérite (100%)
76	83	164	Weddy	730830	473340	Complexe gneissique (50%), gneiss charnockitique (50%)
77	84	166	Cap	725240	472930	Gneiss charnockitique (100%)
78	86	172	S.N. 87388	721200	473200	Complexe gneissique (100%)
79	87	174	Lac du Nirvana	715300	472850	Mangérite (100%)

N: Numéro des lacs N1: Numéro des lacs INRS-Eau N2: Numéro des lacs Environnement Canada

ANNEXE A

BASSINS VERSANTS INVENTORIÉS: LOCALISATION ET GÉOLOGIE

No des lacs N	NI	N2	Nom du lac	Coordonnées Longitude	Latitude	Géologie (importance relative)
80	88	176	Tapp	713320	473230	Mangérite (100%)
81	89	183	S.N. # 87388	704200	473300	Gneiss charnockitique (100%)
82	91	197	Guernon	720030	472230	Migmatite (100%)
83	92	200	Veilleux	713430	472340	Mangérite (100%)
84	93	205	McLeod	705840	472800	Mangérite (100%)
85	94	206	Pied des Monts	705120	472420	Gneiss charnockitique (100%)
86	95	213	Fauvette	731400	472020	Migmatite charnockitique (100%)
87	97	219	S.N. # 90997	722310	471830	Migmatite (100%)
88	98	221	Garneau	720930	472220	Migmatite (100%)
89	99	222	Alphonse	720430	471730	Mangérite (100%)
90	100	223	en Zigzag	715850	472000	Migmatite (100%)
91	101	224	Lagou	714920	471815	Mangérite (100%)
92	102	225	Gosselin	714000	472200	Mangérite (100%)
93	103	241	Lacet	725530	471630	Gneiss charnockitique (100%)
94	104	242	S.N. 86928	724800	471330	Gneiss charnockitique (100%)
95	105	248	Haut	720500	471300	Mangérite (100%)
96	106	253	Bonneville	712400	471640	Mangérite (100%)
97	107	255	du Bec Croche	711200	471350	Gneiss charnockitique (100%)
98	108	257	Turpin	705720	471420	Gneiss charnockitique (100%)
99	109	263	S.N. # 41472	732510	471200	Gneiss charnockitique (100%)

N: Numéro des lacs NI: Numéro des lacs INRS-Eau N2: Numéro des lacs Environnement Canada

ANNEXE A

BASSINS VERSANTS INVENTORIÉS: LOCALISATION ET GÉOLOGIE

No des lacs N	NI	N2	Nom du lac	Coordonnées Longitude	Latitude	Géologie (importance relative)
100	111	265	Vachon	731220	471020	Gneiss charnockitique (100%)
101	112	267	du Camp	725800	470930	Paragneiss (50%), granite à biotite (50%)
102	113	271	des Léplotes	722220	470630	Diorite (35%), granodiorite (35%), migmatite (30%)
103	114	277	S.N. # 25448	713900	471050	Mangérite (100%)
104	115	279	Saint-Guillaume	712530	470900	Mangérite et gneiss charnockitique (100%)
105	116	287	S.N. # 86445	735230	470640	Granite avec pegmatite (100%)
106	117	288	Nolette	734730	470500	Granite avec pegmatite (100%)
107	119	290	du Nénuphar	732730	470600	Gneiss charnockitique (100%)
108	120	295	S.N. # 91010	725330	470330	Granite à biotite (80%), gabbro (20%)
109	121	296	Tom	724440	470230	Gneiss charnockitique et charnockite (100%)
110	123	300	à Charles	721400	470130	Migmatites (100%)
111	124	301	Najoue	720500	470230	Granites avec pegmatite (100%)
112	126	312	Turc	741700	470220	Granite (50%), syénite (50%)
113	127	316	Ricard	734500	465850	Migmatite (100%)
114	128	319	de l'Epervier	731900	470100	Gneiss charnockitique (100%)
115	130	321	Enard	725100	470140	Paragneiss (90%), metagabbro (10%)
116	131	326	Arcale	722300	465900	Granite avec pegmatite (100%)
117	133	340	de l'Isle	740740	465240	Migmatite (100%)
118	134	344	du Baril	733800	465240	Migmatite (100%)
119	135	349	Eclair	730010	465100	Migmatite à plagioclase, hornblende, biotite (100%)

N: Numéro des lacs NI: Numéro des lacs INRS-Eau N2: Numéro des lacs Environnement Canada

ANNEXE A

BASSINS VERSANTS INVENTORIÉS: LOCALISATION ET GÉOLOGIE

No des lacs N	N1	N2	Nom du lac	Coordonnées Longitude	Latitude	Géologie (importance relative)
120	136	356	Adanys	741930	464820	Gneiss à pyroxène (100%)
121	138	360	de la Pomme	734500	465000	Migmatite (100%)
122	139	363	Leech	733140	464930	Migmatite (100%)
123	140	375	S.N. # 36724	740240	464530	Paragneiss (50%), marbre (50%)
124	141	379	Clut	733340	464420	Gneiss à amphibole, biotite, pyroxène (100%)
125	142	380	des Joncs	732300	464500	Gneiss intermédiaire (100%)
126	143	383	S.N. # 54990	725920	464230	Gneiss à pyroxène et hornblende (100%)
127	144	388	des Jésuites	744140	463830	Paragneiss (35%), monzonite (35%), granite (30%)
128	145	390	Daulé	742630	463830	Gneiss à pyroxène, à sillimanite et grenat (60%), granulite charnockitique (40%)
129	146	396	Ecartant	733540	463800	Gneiss à amphibole, biotite et pyroxène (100%)
130	148	400	Thibert	731000	463900	Complexe gneissique à biotite, amphibole et hornblende (100%)
131	150	409	Petit lac Vasseur	740830	463440	Marbre (25%), migmatite (25%), paragneiss (50%)
132	151	416	S.N. # 53814	731530	462930	Gneiss granitique (100%)
133	152	426	Bois-Francs	741900	462700	Gneiss granitique (50%), quartzite (50%)
134	153	427	Laurent	741200	462830	Gneiss à biotite, pyroxène et hornblende (100%)
135	154	428	Casse-Ligne	740130	462510	Monzonite à pyroxène (100%)
136	155	433	Cailloux	732220	462920	Gneiss granitique, gneiss à pyroxène (60%), quartzite (40%)
137	156	438	Dupré	750400	462130	Quartzite (100%)
138	157	441	General White	744100	462200	Paragneiss de Grenville (35%), monzonite (35%), granite (30%)
139	158	444	Honoré	741930	462120	Gneiss granitique (100%)

N: Numéro des lacs N1: Numéro des lacs INRS-Eau N2: Numéro des lacs Environnement Canada

ANNEXE A

BASSINS VERSANTS INVENTORIÉS: LOCALISATION ET GÉOLOGIE

No des lacs N	N1	N2	Nom du lac	Coordonnées Longitude	Latitude	Géologie (importance relative)
140	159	448	Pintac	734740	462200	Gneiss charnockitique (100%)
141	160	455	Colour	751030	461730	Diorite à pyroxène (35%), granodiorite (35%), calcaire cristallin (30%)
142	161	457	Anita	745300	461900	Paragneiss (30%), monzonite (40%), granite (30%)
143	162	458	Vigné	744530	461540	Paragneiss (30%), monzonite (40%), granite (30%)
144	163	461	Poisson	742800	461730	Mangérite (100%)
145	164	464	Copping	740410	461600	Anorthosite et gabbro anorthositique (100%)
146	165	475	S.N. # 19222	745800	460830	Paragneiss (30%), monzonite (40%), granite (30%)
147	166	477	S.N. # 60100	744030	460900	Paragneiss (30%), monzonite (40%), granite (30%)
148	167	482	Truite Rouge	740500	460900	Anorthosite gabbroique (100%)
149	168	484	S.N. # 53665	734700	461330	Paragneiss (50%), roche à carbonate silicatée (50%)
150	169	491	des Papillons	752000	460630	Syénite (100%)
151	170	496	Vinet	744340	460730	Paragneiss (30%), monzonite (40%), granite (30%)
152	171	512	Chevreuil	745600	460300	Paragneiss (30%), monzonite (40%), granite (30%)
153	172	518	Léon	740800	460100	Anorthosite (100%)
154	173	522	S.N. # 56511	754820	455540	Monzonite (100%)
155	174	526	Thomas	752040	455530	Monzonite (100%)
156	175	539	Duck	755130	455030	Paragneiss (35%), migmatite (35%), quartzite (30%)
157	176	543	Graham	752300	454740	Paragneiss (50%), monzonite (50%)
158	177	549	S.N. # 1952	743300	454730	Paragneiss (30%), monzonite (40%), granite (30%)

N: Numéro des lacs N1: Numéro des lacs INRS-Eau N2: Numéro des lacs Environnement Canada

ANNEXE B

MÉTHODES STATISTIQUES

B. Méthodes statistiques

Le coefficient de corrélation permet de déterminer l'intensité de la relation qui peut exister entre deux variables. Le coefficient, utilisé le plus couramment, est le coefficient paramétrique de Pearson. Le coefficient de corrélation de Pearson (r) est obtenu par la formule suivante:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^{N} (y_i - \bar{y})^2}}$$

où $\bar{x}$ et $\bar{y}$ sont la moyenne des échantillons x_i et y_i, et N est le nombre de mesures.

Par l'emploi d'un test de signification, on peut vérifier si r est significativement différent de zéro. L'hypothèse H_0 à vérifier est = 0. L'hypothèse alternative est H_1 : 0 qui peut se décomposer en 0 (H·) et 0 (H··).
1 1

On calcule la valeur suivante:

$$t = \frac{r}{\sqrt{(1 - r^2) / (N - 2)}}$$

Puisque cette quantité suit une loi de Student à (N-2) degrés de liberté, cette valeur peut être comparée à la valeur critique t (N-2; /2).

- si $-t(N-2;\alpha/2) < t < t(N-2;\alpha/2)$, on accepte H_0 au niveau de la signification
- si t t(N-2;α/2), on rejette H_0 et l'on a H_1: 0
- si t -t (N-2;α/2), on rejette H_0 et l'on a H_1: 0.

L'utilisation du coefficient de corrélation de Pearson nécessite de vérifier que les distributions des variables x et y suivent une loi normale. Par contre, le coefficient de corrélation non paramétrique de Spearman, qui est calculé à partir des rangs, ne nécessite pas la vérification de la normalité des distributions.

Le coefficient de corrélation de Spearman (r_s) est donné par:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^{N} d_i^2}{N(N^2-1)}$$

où d_i est la différence de rang entre l'observation x_i et l'observation$_i$.

De la même manière que pour r, on peut vérifier si r_s est significativement différent de zéro.

- Lorsque N est suffisamment grand (N 10), on calcule la quantité suivante:

$$t = r_s \sqrt{\frac{N-2}{1 - r_s^2}}$$

Puisque cette quantité suit une loi de Student à (N-2) degrés de liberté, cette valeur peut être comparée à la valeur critique t(N-2; /2). Comme on a vu précédemment, on accepte l'hypothèse H_0 (r_s = 0) si la valeur calculée (t) se situe dans la zone d'acceptation comprise entre -t (N-2;α/2) et t (N-2;α/2). L'hypothèse H_0 est rejetée si | t | supérieur à t (N-2;α/2).

- Lorsque N est petit ($N < 10$), on compare r_s avec une valeur critique r_o obtenue de tables. Il existe en fait une table des valeurs de r_o ($N; \alpha$) que $|r_s|$ ne dépasse que dans % des cas. On accepte l'hypothèse H_o ($r_s = o$) si $|r_s| < r_o$ ($N; \alpha/2$). L'hypothèse H_o est rejetée si $|r_s| > r_o$ ($N; \alpha/2$).

- Lorsque N est compris entre 10 et 30, on peut utiliser indifféremment l'une ou l'autre méthode pour vérifier si r_s est significativement différent de zéro. Les résultats obtenus sont similaires.

ANNEXE C

CARACTÉRISTIQUES GÉOLOGIQUES ET BIOPHYSIQUES DES BASSINS VERSANTS

Tableau C.1: Caractéristiques biophysiques des bassins versants de la région étudiée: moyenne et écart-type par groupe homogène.

variables	groupe homogène									
	1		2		3		4		5	
altitude (m)	645	(179)	408	(136)	396	(60)	465	(156)	303	(67)
superf. B.V. (km2)	1,47	(1,92)	1,19	(0,67)	1,36	(0,75)	2,09	(1,36)	0,85	(0,44)
superf. lac (km2)	0,14	(0,10)	0,15	(0,11)	0,23	(0,14)	0,20	(0,14)	0,15	(0,10)
superf. tourb.(km2)	0,011	(0,037)	0,044	(0,046)	0,013	(0,023)	0,044	(0,048)	0,004	(0,006)
précipitation (cm)	126,6	(26,3)	97,3	(10,9)	101,4	(14,0)	106,4	(14,6)	96,1	(6,3)
sup. B.V./sup. lac	10,5	(6,3)	8,9	(3,8)	6,1	(1,3)	12,8	(11,3)	6,5	(2,9)
S.W.-N.E.	7,9	(3,6)	0,66	(5,6)	2,6	(4,7)	1,8	(7,7)	-6,3	(5,2)
S.E.-N.W.	1,8	(1,5)	2,9	(1,6)	3,5	(1,3)	3,4	(1,1)	2,8	(1,2)
ROC + (R+TM) (%)	19,7	(13,8)	7,5	(13,5)	1,5	(2,3)	6,1	(4,4)	13,4	(13,7)
TM/R (%)	24,9	(14,1)	15,3	(15,9)	12,1	(11,1)	23,9	(7,7)	23,7	(12,7)
TM (%)	24,3	(12,6)	28,4	(19,8)	19,1	(14,4)	29,3	(13,6)	25,3	(15,2)
TE (%)	17,5	(18,3)	30,4	(25,6)	47,6	(19,4)	24,9	(10,2)	17,5	(16,4)
ORG (%)	0,47	(1,15)	3,34	(2,97)	0,66	(0,62)	2,16	(1,86)	0,54	(1,05)
AR(F) (%)	16,0	(18,9)	13,5	(12,5)	9,5	(10,0)	13,9	(14,7)	3,5	(5,7)
AR(E) (%)	20,6	(20,9)	11,1	(13,1)	5,1	(10,5)	8,7	(12,0)	11,2	(16,6)
AF(F) (%)	8,9	(13,6)	13,9	(13,6)	26,2	(19,7)	16,3	(20,6)	5,0	(7,6)
AF(E) (%)	8,9	(14,0)	39,9	(19,8)	12,4	(18,8)	23,8	(28,3)	54,3	(25,5)
CP + CT (%)	31,5	(30,5)	4,2	(10,1)	28,2	(19,1)	22,6	(28,8)	6,2	(15,5)
VMH (%)	0,7	(1,4)	3,2	(2,7)	1,7	(4,4)	2,6	(2,2)	1,0	(1,7)

( ) écart-type

Tableau C.2: Caractéristiques géologiques des bassins versants de la région étudiée: moyenne et écart-type des superficies relatives

type de roche	groupe homogène				
	1	2	3	4	5
1	0,0 (0,0)	1,6 (9,0)	4,8 (13,0)	0,0 (0,0)	5,7 (15,7)
2	0,7 (4,1)	13,5 (34,0)	2,7 (10,8)	3,3 (15,3)	0,0 (0,0)
3	2,0 (9,1)	1,9 (7,6)	7,3 (16,5)	0,0 (0,0)	1,5 (7,8)
4	0,0 (0,0)	10,6 (30,2)	28,4 (45,2)	9,5 (30,1)	9,6 (26,9)
5	1,4 (8,2)	4,0 (13,1)	8,6 (23,4)	3,3 (10,6)	13,6 (21,7)
6	6,8 (24,0)	9,7 (27,1)	2,3 (10,7)	9,5 (30,1)	5,3 (18,7)
7	0,0 (0,0)	8,1 (26,1)	2,7 (12,8)	4,8 (21,8)	16,2 (34,6)
8	82,2 (30,0)	31,5 (43,8)	26,8 (39,8)	45,2 (46,3)	22,2 (31,8)
9	2,0 (9,1)	19,0 (36,3)	16,4 (22,8)	21,9 (36,6)	16,6 (24,6)
10	0,0 (0,0)	0,0 (0,0)	0,0 (0,0)	2,4 (10,9)	9,4 (26,6)

( ) écart-type